



Public Safety  
Canada

Sécurité publique  
Canada

## ARCHIVED - Archiving Content

### Archived Content

Information identified as archived is provided for reference, research or recordkeeping purposes. It is not subject to the Government of Canada Web Standards and has not been altered or updated since it was archived. Please contact us to request a format other than those available.

## ARCHIVÉE - Contenu archivé

### Contenu archivé

L'information dont il est indiqué qu'elle est archivée est fournie à des fins de référence, de recherche ou de tenue de documents. Elle n'est pas assujettie aux normes Web du gouvernement du Canada et elle n'a pas été modifiée ou mise à jour depuis son archivage. Pour obtenir cette information dans un autre format, veuillez communiquer avec nous.

This document is archival in nature and is intended for those who wish to consult archival documents made available from the collection of Public Safety Canada.

Some of these documents are available in only one official language. Translation, to be provided by Public Safety Canada, is available upon request.

Le présent document a une valeur archivistique et fait partie des documents d'archives rendus disponibles par Sécurité publique Canada à ceux qui souhaitent consulter ces documents issus de sa collection.

Certains de ces documents ne sont disponibles que dans une langue officielle. Sécurité publique Canada fournira une traduction sur demande.

8A



CANADA

LES EFFETS INCENDIAIRES  
DES  
**ARMES NUCLÉAIRES**

UNE CRITIQUE ET UN GUIDE

MANUEL N° 7 de l'OMU

LIBRARY / BIBLIOTHEQUE  
EMERGENCY PLANNING CANADA  
COMMUNICATION D'URGENCE CANADA  
OTTAWA, ONTARIO

LES EFFETS INCENDIAIRES DES AR  
EPC  
NUCLEAR WEAPONS EFFECTS

06-1-1-300

U  
264  
L47  
1965

ORGANISATION DES MESURES D'URGENCE

OTTAWA

06-1-1-300



# LES EFFETS INCENDIAIRES DES ARMES NUCLÉAIRES

Une critique et un guide

Copyright of this document does not belong to the Crown.  
Proper authorization must be obtained from the author for  
any intended use.

Les droits d'auteur du présent document n'appartiennent  
pas à l'État. Toute utilisation du contenu du présent  
document doit être approuvée préalablement par l'auteur.



Préparé pour

L'ORGANISATION DES MESURES D'URGENCE

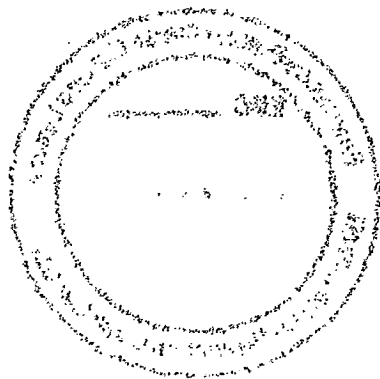
avec la collaboration du

CONSEIL DE RECHERCHES POUR LA DÉFENSE

par

SWANSON AND ASSOCIATES

Ingénieurs-conseils, Toronto



ROGER DUHAMEL, M.S.R.C.  
IMPRIMEUR DE LA REINE ET CONTRÔLEUR DE LA PAPETERIE  
OTTAWA, 1965

N° de cat. Id 83-2/7F

## TABLE DES MATIÈRES

Chapitre		Page
1	Avant-propos	1
2	L'incendie – instrument de guerre	3
3	Émission thermique provenant de l'arme nucléaire	5
4	Action de l'atmosphère sur la transmission des radiations thermiques	13
5	Effets de la topographie sur le dégagement de la chaleur	19
6	Combustibles et combustibilité	33
7	Inflammation des matières cellulosiques solides	37
8	Embrasement et espacement	51
9	Incendies gigantesques	61
10	Les effets des incendies sur les matériaux de construction	65
11	Effets du feu sur les forêts et les récoltes vivrières	73
12	Comment réduire les pertes dues aux incendies au cours d'une attaque nucléaire	75
Annexe A	Émission thermique des engins explosant à haute altitude	79
Annexe B	Petit glossaire des expressions utilisées	93
	(Ouvrages de référence)	95

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Numéro	Titre	Page
3.7.1	Variation de la température à la surface de la boule de feu, avec indication de temps, dans le cas d'une arme d'une puissance totale de 20 kilotonnes	7
3.8.1	Émission de radiations thermiques en deux impulsions (explosions aériennes)	8
3.9.1	Graphique illustrant le rapport entre l'intensité de chaleur et l'élément temps, en présence de l'énergie libérée par des armes nucléaires de 10 mégatonnes et de 100 kilotonnes	9
4.10.1	Coefficients de transmission $\tau_A$ en fonction de diverses conditions atmosphériques et de la surface du sol	16
5.2.1.a	Boule de feu totalement cachée par un obstacle	18
5.2.1.b	Boule de feu à demi cachée par un obstacle	18
5.3.1	Une comparaison entre l'arrivée des ondes de choc et le moment où la puissance thermique atteint le point maximum, après une détonation d'armes de 100 kilotonnes, 1,5 et 10 mégatonnes, à une altitude de 5,000 pieds.	20
5.4.1	Portions visibles de la boule de feu, vues d'un combustible situé dans une pièce	22
5.7.1	Rayon de la boule de feu, en pieds, lorsque la puissance thermique est la plus intense	24
5.9.1	Alignement de l'appareil photographique et relation entre l'image et la boule de feu	27
5.9.2	Image de la boule de feu vue par l'appareil photographique au moment où les radiations sont les plus intenses. Les régions ombrées représentent la partie invisible de l'image	28

# LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX (suite)

Numéro	Titre	Page
5.9.3	Diagrammes représentant l'impulsion thermique initiale et de décharge pour une arme de 1 mégatonne, qui éclate à 20,000 pieds de distance et à 5,000 pieds d'altitude; 57 p. 100 visible	30
5.11.1	Coefficient de transmission $\tau_W$ pour la chaleur irradiée à travers la vitre et la moustiquaire d'une fenêtre	32
7.16.1	Expositions à l'irradiation nécessaires pour provoquer l'inflammation de certains matériaux (humidité relative de 40 à 50%) en fonction de la puissance totale de l'arme. Extrait de "Rayonnement thermique et effets incendiaires des explosions nucléaires". Par S. Martin et A. Broido	43
7.16.2	Expositions à l'irradiation nécessaires pour provoquer l'inflammation de différents matériaux en fonction de la puissance totale de l'arme. Extrait de "Objectif technique AW-7" par J. Bracciaventi et F. Debold, juillet 1960	44
7.17.1	Graphique du comportement de l'inflammation donnant les diverses zones et le seuil d'inflammation spontanée. Tiré de "Dommages causés par la radiation thermique aux substances cellulose, partie III, - Inflammation de la cellulose Alpha par des impulsions simulant des explosions aériennes d'armes nucléaires". Par S.B. Martin et W. Lai	45
7.22.1	Distance du point zéro d'une arme nucléaire ayant une puissance totale de 5 mégatonnes, à laquelle peut se produire l'inflammation spontanée soutenue de papier journal selon différentes altitudes d'explosion, la surface du sol, la visibilité et selon que les fenêtres sont munies ou non de vitres et de moustiquaires	49
8.5.1	Rapports géométriques entre les surfaces rayonnantes et les surfaces absorbantes	52
8.6.1	Dommages par rapport au facteur de structure	54
8.7.1	Illustration du rapport géométrique entre les surfaces rayonnantes et la surface absorbante	55
8.12.1	Évaluation de la probabilité que le feu franchira un espace (dérivation de la 2 <sup>e</sup> guerre mondiale)	58
10.2.1	Résistance de l'acier de construction à l'exposition au feu	66
10.3.1	Les effets de la température sur la résistance des alliages d'aluminium corroyés.	68
10.6.1	Perte de résistance à la compression du béton en ciment Portland soumis à la chaleur et essayé à la température de la pièce. (Adapté de "Effet des températures élevées sur le béton composé de différents agrégats" par N.G. Zoldners)	69
10.6.2	Perte de la résistance à la flexion du béton de ciment Portland soumis à la chaleur et essayé à la température de la pièce. (Adapté de "Effet des températures élevées sur le béton composé de différents agrégats" par N.G. Zoldners)	70
A.4.1	Forme et emplacement approximatifs de la boule de feu dans le cas d'explosions nucléaires de très grande puissance à cinq altitudes choisies arbitrairement	80
A.5.1	Graphique du rapport puissance-temps d'une explosion nucléaire à haute altitude	81
A.6.1	Variation puissance-temps hypothétique de l'émission thermique d'une arme explosant à haute altitude qui libère 1 calorie par centimètre carré, une seconde après l'explosion (on trouvera à l'alinéa A.6 l'explication du graphique)	83
A.7.1	Puissance totale de l'engin requise à une altitude donnée d'explosion pour lancer trois flux énergétiques sur une surface horizontale au point zéro 1 à 10.sec. après l'explosion	86

## LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX (suite)

Numéro	Titre	Page
A.7.2	Flux énergétique reçu par des surfaces orientées de façon optimale, en fonction de la distance à partir du point zéro	87
A.8.1	Facteurs d'atténuation atmosphérique des explosions nucléaires à haute altitude en fonction de l'angle d'élévation du rayon au-dessus de l'horizontale par temps clair au niveau de la mer. Adaptation de l'ouvrage de T.O. Passell intitulé: "Transmission par l'atmosphère de l'énergie thermique libérée par l'explosion d'armes nucléaires à une altitude de 50 km."	88
A.8.1	Incidence de la nébulosité au-dessus de quelques villes canadiennes exprimée en pourcentage de temps d'un mois solaire. Adaptation de certaines observations qui ont été faites pendant dix ans (jan. 1953 – déc. 1962) par la direction de la météorologie du ministère des Transports, gouvernement du Canada	89
A.8.2	Facteurs d'atténuation atmosphérique des explosions nucléaires à haute altitude en fonction de l'épaisseur ou de la densité des nuages, d'après des observations visuelles. Adaptation d'un ouvrage de T.O. Passell intitulé: "Transmission par l'atmosphère de l'énergie thermique provenant de l'explosion d'armes nucléaires à une altitude de 50 km."	90
A.11.1	Puissance et énergie thermiques requises pour produire l'inflammation soutenue de papier journal, les conditions de puissance élevée étant de brève durée	91



## **PREMIÈRE PARTIE**

### **AVANT - PROPOS**

1.1 On prévoit qu'en temps de guerre l'explosion d'armes nucléaires au-dessus des villes allumera de vastes incendies. Ce manuel est destiné avant tout à réunir et à comparer les données disponibles sur les effets incendiaires de ces armes afin d'évaluer les pertes matérielles qui en sont le résultat. Le caractère des incendies allumés sous l'effet de l'énergie radiante est fonction non seulement de la puissance totale de l'arme nucléaire et de la hauteur à laquelle l'explosion a lieu, mais aussi des conditions atmosphériques, des accidents de terrain et de la présence sur les lieux de matières très inflammables, comme le papier.

1.2 Il faut nécessairement se fonder sur plusieurs hypothèses pour évaluer l'étendue des zones où des incendies peuvent éclater. Il y a deux hypothèses fondamentales: la première — les incendies allumés sous l'effet de la chaleur radiante dégagée par ces armes déterminent les limites mêmes de ces zones, tandis que les incendies causés par des fours renversés, des courts-circuits ou autres incendies du même genre ne sont que des cas isolés au-delà de ces limites. En d'autres termes, les incendies, qui sont la conséquence indirecte des effets du souffle, sont moins importants que ceux occasionnés par le dégagement de la chaleur. La seconde — il existe un très grand risque de vastes incendies causés par les matières combustibles légères et solides, qui se trouvant dans les immeubles, prennent feu et continuent de brûler. Ceci veut dire qu'il faut s'attendre à subir des pertes matérielles considérables du fait de la propagation d'incendies, petits à l'origine. Ces hypothèses, les incertitudes entourant l'emploi d'armes nucléaires et les phénomènes naturels qui s'y rattachent, enfin le fait même de l'incendie, voilà autant de facteurs qui empêchent de déterminer avec exactitude l'étendue des zones incendiées, par l'application de la méthode préconisée dans ce manuel. Néanmoins, on estime cette méthode suffisamment précise pour servir à la planification.

1.3 On sait que la plupart des données relatives au danger d'incendie, encore valables en 1962, sont aujourd'hui dépassées. Les renseignements que fournit ce manuel sont les plus récents et à notre avis bien fondés mais il n'en est pas moins vrai que des travaux de recherche plus récents pourraient bien révéler le caractère inexact ou incomplet de ces informations. Cependant, ce manuel s'inspire en grande partie des résultats d'enquêtes menées par des personnes compétentes et sérieuses; aussi est-on en droit d'espérer que les changements qui s'imposeront dans l'avenir seront relativement peu importants.





## DEUXIÈME PARTIE

### L'INCENDIE: INSTRUMENT DE GUERRE

2.1 L'incendie, instrument de guerre dirigé contre les villes, est d'autant plus destructeur qu'il se propage en beaucoup d'endroits à la fois et avec une rapidité telle que les services locaux de lutte contre l'incendie sont tout à fait débordés. La négligence à éteindre ou à circonscire les feux peu importants consacre parfois le succès d'une attaque; laissés à eux-même, ces feux peuvent devenir de véritables sinistres, embrasant des quartiers entiers de la ville. L'étendue des ravages est en grande partie fonction du temps perdu à reprendre la situation en mains.

2.2 On a eu recours depuis très longtemps au feu pour faire la guerre. Dirigée contre des villes fortement agglomérées, cette arme a souvent fort bien réussi. Toutefois, l'adoption de systèmes bien organisés de prévention des incendies rend de semblables réussites peu probables aujourd'hui, à moins d'accroître à la fois la rapidité et la portée de ce genre d'attaque. On peut affirmer sans risque de se tromper que les moyens prévus, il y a cent ans, pour venir à bout d'une ville par le feu seraient pour le moins inefficaces aujourd'hui. Les plus récentes attaques massives par le feu ont eu lieu au cours de la Seconde Guerre mondiale: bombardement aérien de Hambourg, Dresde, Kassel, Tokyo et Hiroshima. Ces villes ont subi les plus fortes pertes matérielles enregistrées au cours de cette guerre. Dans chacun de ces cas, l'attaque se caractérisait par sa rapidité et sa portée, de nature à rendre presque totalement inefficace la lutte contre les incendies. On a très tôt perdu la maîtrise de la situation; quand on l'a reprise, les pertes matérielles atteignaient déjà des proportions gigantesques.

2.3 A noter qu'une seule des villes mentionnées, Hiroshima, a subi une attaque nucléaire. A Hiroshima, la destruction par le feu fut moindre qu'à Hambourg, et à Nagasaki, deuxième ville à subir l'attaque nucléaire, le feu fit moins de ravages encore que dans les deux autres villes, aussi, il n'est pas permis de conclure que les armes nucléaires entraînent plus de destruction par le feu que les armes dites classiques. Depuis 1945, la puissance de l'énergie dégagée par les armes nucléaires croît sans cesse; si bien qu'on peut prévoir une augmentation correspondante de l'étendue de la région susceptible de subir les effets de la chaleur émise par l'éclatement de ces armes.

2.4 L'attaque nucléaire, il est vrai, représente une économie en avions et en missiles, et, par conséquent, est plus facile à monter qu'une attaque appuyée par des armes incendiaires classiques; néanmoins, ce dernier genre d'attaque comporte de nombreux avantages sur le premier. Ainsi, l'attaque de type classique est lancée suivant un plan uniforme de densité de tir ou tout autre plan établi d'avance. En raison de la nature même de l'arme nucléaire, il est impossible de prévoir l'étendue des effets thermiques dans le cadre d'un plan uniforme ou défini d'avance; cette arme gaspille en quelque sorte de l'énergie en atteignant un degré inutilement élevé de destruction matérielle aux abords immédiats du centre de l'explosion. De plus, l'étendue de la zone sinistrée à la suite d'une attaque appuyée par des armes classiques n'est pas au même point fonction de facteurs météorologiques ou d'accidents topographiques que l'étendue de la zone sinistrée dans le cas d'une attaque lancée avec des armes nucléaires. Enfin, les armes classiques sont en général plus efficaces quant à la gamme des matières combustibles auxquelles elles parviennent à mettre le feu. Néanmoins, une arme nucléaire de grande puissance peut allumer des incendies dans une ville, sur une surface de plusieurs milles carrés, résultat qu'on ne saurait attendre aujourd'hui de raids aériens semblables à ceux qui ont caractérisé la Seconde Guerre mondiale.

2.5 L'exposé qui suit indique comment évaluer les pertes matérielles possibles, provenant d'incendies allumés dans une ville, à la suite d'une attaque nucléaire. Presque tous les renseignements donnés sont extraits des nombreux rapports sur les effets des armes nucléaires, ou reposent sur les connaissances acquises à la lueur d'expériences dans ce domaine. Les effets du souffle et des radiations nucléaires ne feront guère l'objet de commentaires, mais il ne faut pas en conclure à la plus grande importance des effets du feu. Cet exposé cherche plutôt à donner à ce genre de destruction la place qui lui revient par rapport aux effets du souffle et des radiations nucléaires.

## TROISIÈME PARTIE

### ÉMISSION THERMIQUE

### PROVENANT DE L'ARME NUCLÉAIRE

3.1 Au moment de l'explosion d'une arme nucléaire, 80 p. 100 environ de l'énergie se dégage sous forme de rayons X et ultra-violetes qu'absorbe, rapidement et à faible distance, l'air ambiant. L'énergie qui reste se dégage sous forme de radiations nucléaires: neutrons, particules alpha et bêta, et rayons gamma. Ce dernier élément ne contribuant nullement à allumer les incendies, il a été jugé inutile d'en étudier ici les effets.

3.2 Une proportion importante de l'énergie radiante absorbée provoque une agitation des atomes et des molécules de l'oxygène et de l'azote atmosphériques. Une partie de cette énergie est libérée sous forme d'énergie cinétique; ce qui reste s'accumule sous forme d'énergie atomique ou moléculaire internes. Le champ d'absorption de l'énergie libérée est fonction de la densité atmosphérique, et, par conséquent, de l'altitude à laquelle se produit l'explosion. Au niveau de la mer, l'absorption se fait à quelques pieds de l'arme, tandis qu'à trente milles d'altitude, environ, le champ d'absorption s'étend sur plusieurs milliers de pieds.

3.3 Une arme d'une kilotonne peut libérer une somme d'énergie d'environ  $10^{12}$  calories et les rayons X et ultra-violetes qui en résultent se propagent presque instantanément; aussi est-il facile d'apprécier l'effet extrêmement violent de cette explosion sur le champ d'absorption. L'air, sous l'effet du choc, atteint une température très élevée et cherche à se débarrasser de l'énergie absorbée et à revenir à des conditions d'équilibre, en dispersant l'excès de cette énergie dans l'air ambiant qui, à son tour, se réchauffe à peu près uniformément. Au début de cette période, que caractérise la formation de la boule de feu, l'énergie libérée à la surface de la sphère d'air chaud, en voie d'expansion, s'apparente à des ondes électro-magnétiques très courtes, à faible rayonnement, dans l'atmosphère. Ces ondes sont constituées principalement par des rayons X "mous" qui soumettent l'air en face de la sphère à un choc et le réchauffent encore davantage.

3.4 Avant de traiter des phénomènes consécutifs à la formation de la boule de feu, il faut établir une distinction entre les explosions provoquées à des altitudes inférieures à 100,000 pieds par exemple, et celles qui ont lieu à des altitudes plus élevées. Cette distinction s'impose en raison des différences très prononcées des caractéristiques propres aux émissions thermiques, différences qui proviennent de la diminution de la densité atmosphérique au fur et à mesure qu'on s'élève au-dessus de la terre. Nous n'allons pas comparer ces différences au cours du présent chapitre afin de ne pas nuire à la continuité de cet exposé. Notons simplement que cette altitude de 100,000 pieds ne représente pas un point nettement défini, critique, marquant un changement brusque de l'émission même, mais qu'il s'agit plutôt du choix arbitraire d'une altitude qui se situe entre deux séries de caractéristiques, propres à la boule de feu. Il faut se souvenir que la description ci-après correspond à des explosions produites à moins de 100,000 pieds. Les explosions provoquées à des altitudes supérieures font l'objet de l'annexe A.

3.5 La chute à  $300,000^{\circ}$  C environ de la température à l'intérieur de la boule de feu, créée par l'explosion d'une arme nucléaire à moins de 100,000 pieds d'altitude, donne naissance à une tête de choc qui se forme dans l'air réchauffé, se dégage de la boule de feu et se propage très rapidement autour de la boule. Cette tête de choc réchauffe et comprime l'air qu'elle rencontre à mesure qu'elle s'éloigne du centre de l'explosion. Deux phénomènes qui accompagnent les impulsions de l'onde de choc ont un effet puissant et assez curieux sur l'émission de la chaleur par une arme nucléaire. Tout d'abord, la violence du choc entraîne la forma-

tion de quantités petites mais sensibles d'ozone, de bioxyde d'azote et d'autres substances qui possèdent une forte puissance d'absorption des radiations électro-magnétiques à ondes courtes se trouvant à la surface chaude de la boule de feu. Il en résulte alors ceci: bien que la température s'élève à environ  $300,000^{\circ}\text{C}$  au moment de la formation de la boule de feu, un observateur posté à quelque distance enregistre une température "apparente", beaucoup moins élevée, à la surface de la boule de feu. A mesure que la tête de choc avance, la température "réelle" de la surface baisse, mais cette diminution provient de radiations d'ondes plus longues que l'atmosphère absorbe moins facilement de sorte que l'observateur se croit en présence d'une anomalie: la température à la surface lui semble s'élever. Ayant atteint un point maximum, la température "apparente" diminue jusqu'à ce que les températures "apparente" et "réelle" de la tête de choc correspondent à  $1,800^{\circ}\text{C}$ . Pendant cette période, les impulsions ralentissent et la température de la tête de choc baisse, si bien que la possibilité de produire des substances à grand pouvoir d'absorption, ozone ou bioxyde d'azote par exemple, diminue proportionnellement. En même temps, une forte proportion des radiations électro-magnétiques qui caractérisent une surface relativement froide d'une boule de feu se compose de rayons lumineux visibles et infra-rouges, très pénétrantes, que ces absorbeurs atmosphériques n'influencent guère.

3.6 Le deuxième phénomène a trait à l'effet de la tête de choc sur le noyau plus chaud de la boule de feu dont elle forme en quelque sorte l'enveloppe. En raison de la différence de température, les longueurs d'ondes des radiations propres au noyau de la boule de feu sont uniformément plus courtes que celles de la tête de choc. Il en résulte que l'air qui se trouve en avant de la tête de choc, et qui est comprimé, devient un excellent absorbeur de l'énergie qui se dégage du noyau de la boule de feu. C'est pourquoi l'observateur croit voir une enveloppe extérieure "opaque" qui lui cache le noyau chaud de la boule de feu. Cet effet se maintient jusqu'à ce que la température de la tête de choc décroisse jusqu'à  $1,800^{\circ}\text{C}$ , moment où le noyau apparaît graduellement. Il se produit alors une seconde augmentation de la température "apparente" à la surface de la boule de feu, augmentation constatée par l'observateur. La température "réelle" à la surface du noyau visible se situe alors aux alentours de  $7,500^{\circ}\text{C}$  à  $8,000^{\circ}\text{C}$ . Ceci est normal lorsqu'on se trouve en présence d'un spectre de rayons électro-magnétiques circonscrits par des gammes d'ondes ultra-violettes, lumineuses visibles et infra-rouges moins faciles à absorber que les rayons X "mous". Par conséquent, on peut s'attendre que la température "apparente" à la surface de la boule de feu s'élève de  $1,800^{\circ}\text{C}$  jusqu'à la température réelle d'environ  $7,500^{\circ}\text{C}$  à  $8,000^{\circ}\text{C}$ , puis, avec le temps, diminue graduellement à mesure que la boule de feu refroidit.

3.7 Ces deux phénomènes sont illustrés sous forme de graphiques, à la figure 3.7.1. Il faut noter que bien que la température "apparente" de la boule de feu, enregistrée par l'observateur, ne corresponde pas à la température réelle, au cours des premières phases suivant l'explosion, il n'en demeure pas moins qu'elle constitue une indication exacte de la chaleur reçue, en fait, au poste occupé par l'observateur. C'est naturellement l'élévation de température qui occasionne des incendies. Le graphique permet de constater que les premières impulsions de température sont d'une durée inférieure aux secondes qui servent à déterminer la température réelle.

3.8 Ce qui précède décrit bien les températures à la surface de la boule de feu et constitue un guide utile en tant que description qualitative; cependant on ne peut guère s'y reporter pour étudier le problème de l'émission thermique et des incendies qui en résultent. A cet égard, il est plus utile de s'attacher à l'étude de l'énergie thermique et de la puissance correspondante, libérées en un point précis à l'intérieur de la cible. En se basant sur les deux phases caractéristiques des impulsions de température à la surface de la boule de feu (figure 3.7.1.) on peut conclure que la libération d'énergie thermique se fera également en deux impul-

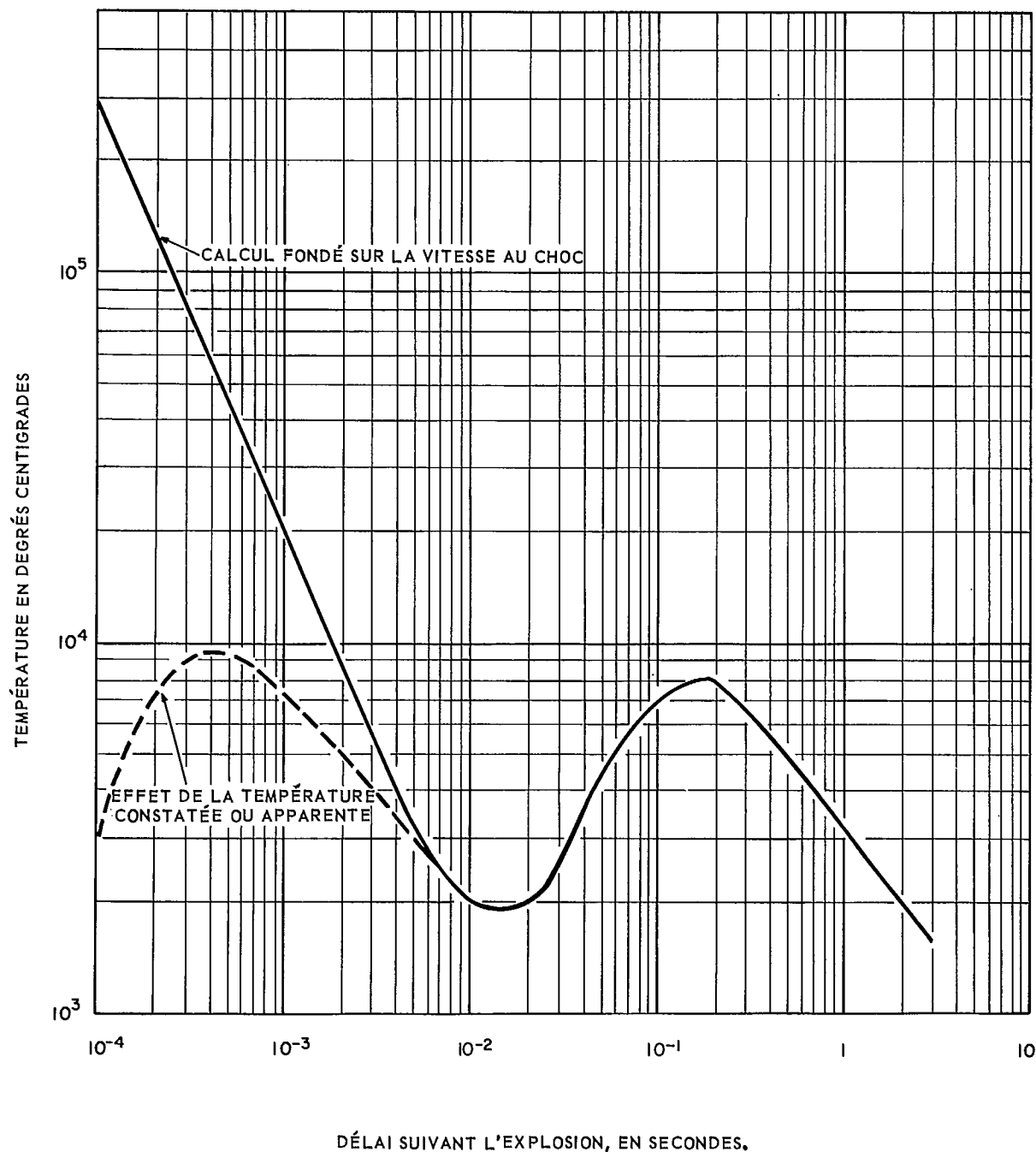


FIG. 3.7.1. VARIATION DE LA TEMPÉRATURE À LA SURFACE DE LA BOULE DE FEU, AVEC INDICATION DE TEMPS, DANS LE CAS D'UNE ARME D'UNE PUISSANCE TOTALE DE 20 KILOTONNES

sions et que la puissance dégagée atteindra deux points maximums. C'est ce que démontre la figure 3.8.1. La première impulsion étant de très brève durée, on peut n'en pas tenir compte sans grand risque d'erreur et porter son attention sur la seconde impulsion. Donc, l'exposé qui suit ne traitera que de la chaleur dégagée par cette seconde impulsion.

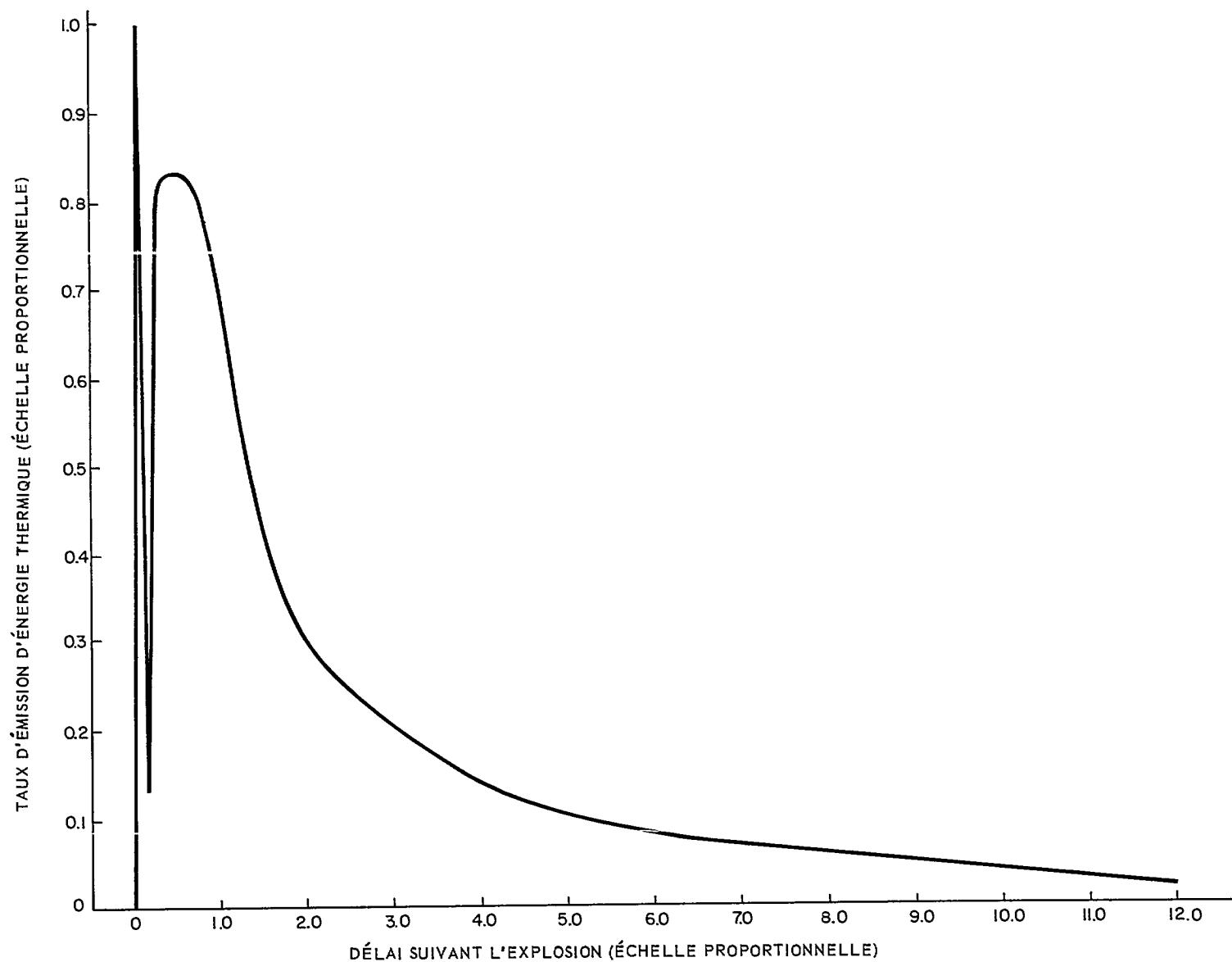


FIG. 3.8.1. ÉMISSION DE RADIATIONS THERMIQUES EN DEUX IMPULSIONS (EXPLOSIONS AÉRIENNES).



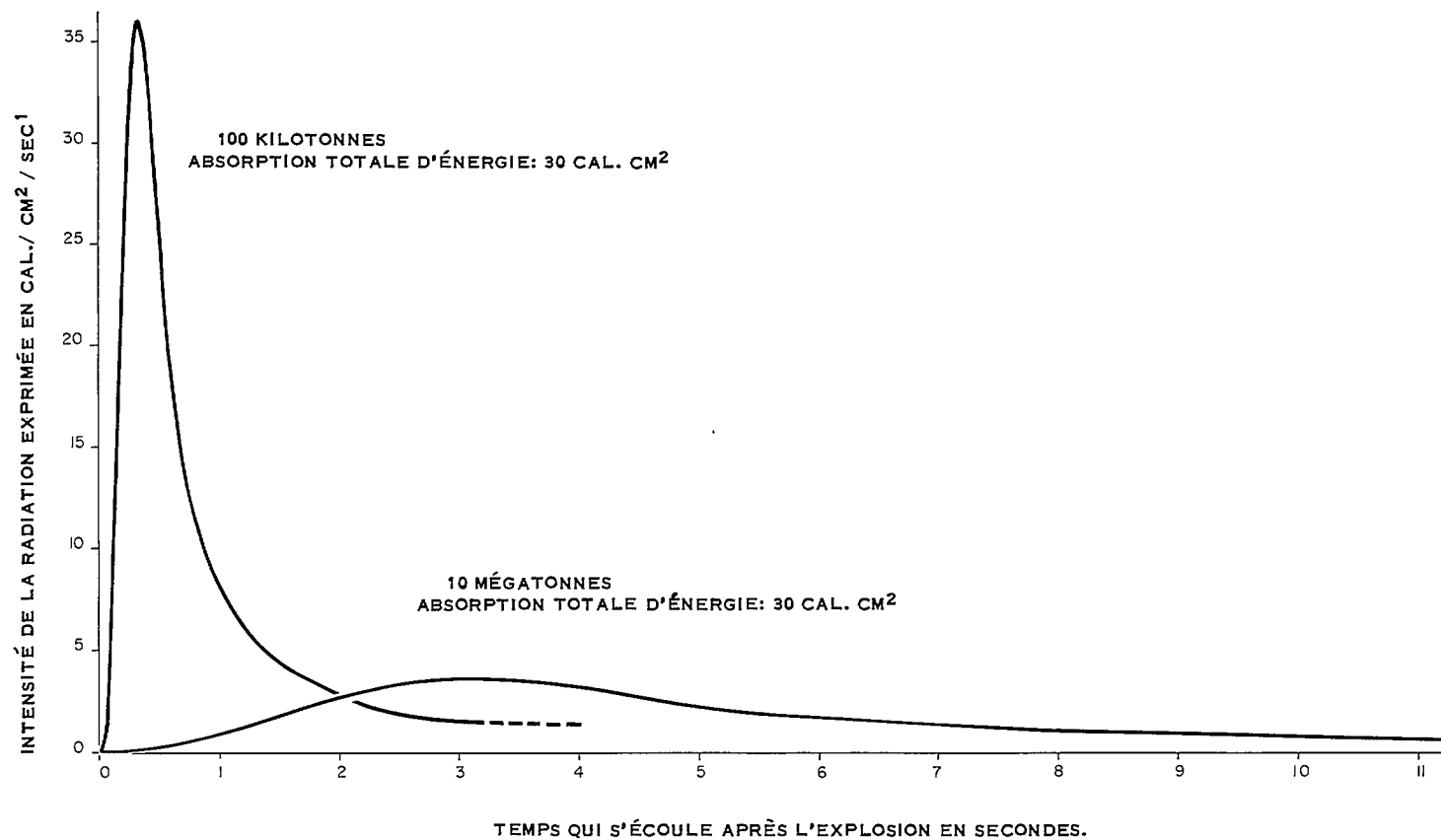


FIG. 3.9.1. GRAPHIQUE ILLUSTRANT LE RAPPORT ENTRE L'INTENSITÉ DE CHALEUR ET L'ÉLÉMENT TEMPS, EN PRÉSENCE DE L'ÉNERGIE LIBÉRÉE PAR DES ARMES NUCLÉAIRES DE 10 MÉGATONNES ET DE 100 KILOTONNES.

3.9 On peut décrire la puissance thermique et la chaleur totale libérées en un point déterminé de la cible, en établissant certains rapports mathématiques approximatifs. Ces calculs se fondent sur les données recueillies à la suite d'expériences et sur l'adaptation de courbes simples de type connu aux courbes qui correspondent à la seconde impulsion d'énergie indiquée à la figure 3.8.1. On estime à environ un tiers de l'énergie totale, libérée au moment de l'explosion, la puissance incendiaire d'une arme nucléaire. De prime abord, ceci semble peu conforme à la puissance de 80 p. 100 dont fait état l'alinéa 3.1. Cependant, la plus grande partie de cette énergie est absorbée par le choc et l'éclatement, et une faible partie seulement est convertie en chaleur. Naturellement, avec le temps, presque toute la puissance de l'arme se transforme en chaleur, mais cette transformation prend tellement de temps que seule la chaleur dégagée à la surface de la boule de feu est une cause importante d'incendies. En supposant que la chaleur est libérée depuis une source ponctuelle, qu'elle traverse un vide pour atteindre la cible, on peut exprimer par l'équation 3.9.1. la chaleur libérée par unité de terrain. La puissance thermique libérée peut être représentée par l'équation 3.9.2. Il s'agit là de rapports approximatifs et non précis.

$$Q = \frac{W}{4.51} \times \frac{10^8}{R^2} \quad - 3.9.1$$

$$P = \frac{2 \times 10^{14}}{WR^2} \times t^3 \times e^{\frac{-93.75t}{\sqrt{W}}} \quad - 3.9.2$$

où Q = La chaleur totale libérée en calories x cm<sup>2</sup>  
P = La puissance thermique libérée en calories x cm<sup>2</sup> x sec<sup>-1</sup>  
W = La puissance totale de l'arme en kilotonnes.  
t = Le temps qui s'écoule depuis l'explosion, en secondes.  
R = La distance, en pieds, du point d'explosion au point déterminé de la cible.

Il est intéressant de tracer les courbes de puissance qui correspondent à l'importance relative de diverses armes et de comparer ces courbes. Les graphiques donnés à la fig. 3.9.1. établissent le rapport entre la puissance (ou suivant les expressions équivalentes, l'intensité, le rayonnement, le flux) et l'élément temps dans le cas de deux armes, l'une d'une puissance totale de 100 kilotonnes, l'autre d'une puissance totale de 10 mégatonnes. Dans chaque cas, on a fixé arbitrairement la chaleur dégagée à 30 calories par centimètre carré. L'examen des graphiques démontre clairement que la première arme dégage plus rapidement que la seconde la plus grande partie de sa chaleur de telle manière que ces deux armes atteignent des points culminants d'intensité sensiblement différents. Ceci démontre l'un des plus importants effets de la puissance de l'arme sur la chaleur dégagée. L'alinéa 7 traitera des incendies provoqués par les explosions nucléaires.

3.10 Le délai qui sépare l'explosion du point culminant de puissance est une caractéristique importante d'une arme et ne varie pas. L'équation 3.10.1 exprime le rapport approximatif entre ce délai et la puissance totale de l'arme. Le point culminant approximatif d'intensité thermique

$$t_p = 0.032 \times \sqrt{W} \quad - 3.10.1$$

où  $t_p$  = délai en secondes qui s'écoule entre l'explosion et le point culminant d'intensité thermique.

$W$  = puissance totale de l'arme en kilotonnes

s'exprime par l'équation 3.10.2. Les expressions figurant aux équations 3.9.1. 3.9.2. 3.10.1 et 3.10.2 ne représentent que des approximations, aussi ne faut-il pas chercher à les mettre en corrélation parfaite.

$$P_p = 3.4 \times 10^8 \times \frac{\sqrt{W}}{R^2} \quad - 3.10.2$$

où  $P_p$  = point culminant d'intensité thermique, en calories  $\times \text{cm}^{-2} \times \text{sec}^{-1}$

$W$  = puissance totale de l'arme en kilotonnes

$R$  = distance, en pieds, depuis le centre d'explosion jusqu'à un point déterminé de la cible.

S'il s'agissait d'équations mathématiquement parfaites il serait possible de démontrer que

$$\int_0^{\infty} P dt = Q. \text{ Si cette intégration est exécutée, on constate que l'expression à gauche}$$

est d'environ 40 p. 100 inférieure à celle à droite. Ceci ne représente pas une erreur grave puisque cette erreur se produit surtout après que la plus grande partie d'énergie a été libérée et que la période critique de risques d'incendies nucléaires est passée.

3.11 Il faut souligner que les équations 3.9.1. 3.9.2. et 3.10.2 (mais non l'équation 3.10.1) ne sont valables que dans un cas théorique qui se présenterait si la chaleur était libérée en passant par le vide. Cette théorie ne connaît pas d'application pratique, aussi doit-on modifier ces expressions afin qu'elles correspondent à la transmission thermique qui se produit dans des conditions atmosphériques réelles. Les alinéas qui suivent sont consacrés à cette étude.

3.12 Avant de mettre fin à cette étude de la transmission de la chaleur, il est utile de signaler le terme relatif à la distance,  $R^2$ , qui se trouve dans le dénominateur des équations 3.9.1; 3.9.2 et 3.10.2. L'adoption de ce terme s'explique en imaginant la surface d'une sphère d'un rayon égal à  $R$ , conçue de telle façon qu'un émetteur de chaleur à partir d'une source ponctuelle soit situé au centre de la sphère. Dans une atmosphère de caractère parfaitement uniforme, la chaleur atteint toute cette surface uniformément. Puisque toutes les ondes magnétiques traversent le vide avec la vitesse de la lumière, la puissance émise d'une source ponctuelle à tout moment est sensiblement égale à la puissance atteignant la surface au même moment. Si la puissance à une source ponctuelle et à la surface sont respectivement de  $P_o$  et  $P_R$  alors  $P_o = 4\pi R^2 P_R$ , dans toute expression mathématique pouvant servir à comparer des unités de mesure. En d'autres termes  $P_R$  est inversement proportionnel au carré de la distance depuis la source ponctuelle jusqu'au point récepteur. Ceci explique la remarque qui figure à l'alinéa 2.4, selon laquelle l'arme nucléaire ne constitue pas un engin incendiaire satisfaisant parce qu'il est incapable de libérer uniformément de la chaleur en direction d'une cible.



## CHAPITRE 4

### ACTION DE L'ATMOSPHÈRE SUR LA TRANSMISSION DES RADIATIONS THERMIQUES

4.1 Dans le vide, la chaleur radiante se propage en lignes à peu près droites de l'émetteur à la cible. Les équations relatives à la puissance et à l'énergie, qui figurent aux alinéas 3.9 et 3.10, se fondaient à partir de ces conditions idéales. Dans des conditions réelles lorsque la chaleur traverse véritablement l'atmosphère, ces équations ne sont plus valables. Ceci provient de ce qu'une partie importante de la radiation cesse de suivre des lignes droites continues et aussi, dans une certaine mesure, des pertes de chaleur par suite de son absorption par les gaz atmosphériques.

4.2 Il a été établi que les longueurs d'ondes de l'énergie électro-magnétique libérée au cours de la seconde, et plus importante, impulsion thermique se situaient aux environs de 0.3 à 3.6 microns. Ceci correspond à la chaleur des gammes d'ondes infra-rouges, lumineuses visibles et ultra-violettes. Ces dernières ondes jouent un rôle très minime quant à l'inflammation des matières combustibles.

4.3 On sait que chaque longueur d'onde possède des caractéristiques qui lui sont propres. Comme il y a un nombre infini de longueurs d'ondes dans tout champ déterminé, du genre dont il est question dans le présent exposé, il est évidemment impossible de les étudier toutes. Par conséquent, la méthode la plus fréquemment employée consiste à partager en un nombre approprié le champ des gammes d'ondes. L'étude de chaque gamme d'ondes permet de dresser le tableau des propriétés de chacune afin d'obtenir une vue d'ensemble. L'exactitude de cette méthode est fonction, bien entendu, du nombre des groupes de gammes d'ondes qui ont fait l'objet d'un examen.

4.4 On sait, en particulier, que certaines des longueurs d'ondes du spectre énergétique de la chaleur émise par la boule de feu possèdent des qualités d'absorption considérables dans les gaz atmosphériques. D'autres encore se caractérisent par l'aptitude à être diffusées à partir de particules en suspension dans l'air. Le degré d'absorption et de diffusion varie sensiblement selon la longueur d'onde ou la gamme d'onde. Ainsi, l'acide carbonique et la vapeur d'eau atmosphériques absorbent assez facilement certaines radiations infra-rouges, l'acide carbonique étant le moins efficace des deux. D'autre part, les deux absorbent beaucoup moins facilement les radiations dans le spectre énergétique de la lumière visible. Nous n'avons pas l'intention de traiter ici dans le détail de ces qualités mais nous désirons souligner que l'absorption n'est pas uniquement fonction de la longueur de l'onde mais aussi de la quantité de l'élément absorbant en présence de laquelle l'onde se trouve. Ainsi, l'air ne contient pas toujours la même quantité de vapeur d'eau. On peut donc en conclure que l'absorption variera selon le degré d'humidité relative ambiante. Enfin, la quantité d'acide carbonique contenu dans l'air ne varie pas sensiblement et son pouvoir d'absorption reste toujours essentiellement le même. Heureusement, il suffit en général de préciser qu'il s'agit d'atmosphère humide ou sèche pour estimer avec assez d'exactitude l'effet global.

4.5 Dans des atmosphères réelles, l'absorption joue, en général, un rôle moins important que la diffusion dans la transmission de la chaleur. Le mécanisme est le suivant: la chaleur,

diffusée vers une particule en suspension dans l'air, lui communique une partie de son énergie, puis étant défléchie, quitte sa trajectoire rectiligne pour en suivre une autre. Il est très difficile de prévoir le nombre de fois qu'un seul rayon sera défléchi ni même les différentes trajectoires qui en résulteront. Cependant, à partir de l'hypothèse que lorsqu'elle se produit à l'échelle microscopique la diffraction est diffuse, on peut en déterminer les effets avec suffisamment de précision. Cependant, cette appréciation exige qu'on procède à des expériences dans le domaine des caractéristiques propres aux longueurs d'ondes. Les résultats semblent reposer surtout sur le nombre et les dimensions des particules en suspension dans l'air et, à un degré moindre, sur la répartition des particules selon leurs dimensions. C'est ainsi qu'une ville-cible, où se trouvent un grand nombre de cheminées par lesquelles s'échappe la suie pour se répandre ensuite dans l'air, subira davantage les effets de la diffusion qu'une région rurale.

4.6 La diffusion exerce un double effet sur un récepteur de chaleur dans une région cible. Une partie de la chaleur radiante, dirigée à l'origine en ligne droite depuis le point d'explosion jusqu'au récepteur, est défléchie et la quantité de chaleur libérée en est du fait même diminuée. Pour la même raison, de la chaleur dirigée ailleurs peut être défléchie de sa trajectoire première pour parvenir jusqu'au récepteur et ainsi s'ajouter à la somme d'énergie thermique dégagée directement.

4.7 La chaleur peut aussi arriver à la cible en vertu d'un autre phénomène, celui de la réflexion de la chaleur depuis la surface de la terre. Bien qu'il ne s'agisse pas là, à proprement parler, d'un effet atmosphérique sur la transmission de la chaleur, il est quand même utile d'en tenir compte comme on tient compte de l'absorption et de la diffusion afin d'obtenir une description plus complète des diverses sources de chaleur.

4.8 Toute substance d'origine naturelle absorbe imparfaitement la chaleur. Le degré d'imperfection est en grande partie fonction des caractéristiques propres à la surface que la chaleur doit pénétrer. Ainsi, une surface brillante, reluisante, reflète davantage et absorbe moins de chaleur qu'une surface terne, mate. C'est en ce sens que la surface de la terre reflète la chaleur suivant la nature du sol (c'est-à-dire que la neige, par exemple, constitue un meilleur réflecteur que des pâturages ou des champs labourés). Le rapport entre la chaleur réfléchie et la chaleur libérée, — chiffre pur appelé en général albédo de surface, permet de mesurer les caractéristiques d'absorption et de réflexion.

4.9 Étant donné la très grande diversité de formes et de dimensions des surfaces réfléchissantes, il est presque impossible de déterminer utilement la somme de chaleur reçue par réflexion en un point fixé arbitrairement, dans une région urbaine. Il est en général difficile et très coûteux d'effectuer des études dans ce domaine. En outre, si le point hypothétique de l'explosion est mal choisi, l'étude n'aboutira à aucun résultat valable. Souvent le procédé le plus simple consiste à supposer que la cible se trouve dans un plan de Lambert à diffusion infinie, dont l'albédo correspond à un sol donné. La réunion de ces conditions permet d'analyser mathématiquement la quantité de chaleur obtenue par réflexion en n'importe quel point donné.

4.10 En partant de l'altitude à laquelle se produit l'explosion, des conditions atmosphériques, de l'albédo établi par rapport à la zone cible, et du plan essentiellement plat, à diffusion réfléchissante, propre à la zone cible et à ses environs, il est possible d'aboutir à un coefficient

numérique,  $\tau_A$ . Quand on multiplie par ce coefficient les expressions, indiquant les rapports d'énergie et de puissance, à la droite des équations 3.9.1, 3.9.2, et 3.10.2, valables comme moyens de transmission dans le vide, on obtient des formules qui tiennent compte des effets des conditions atmosphériques réelles sur la transmission thermique. Il serait trop long d'expliquer ici le procédé mathématique qui aboutit au coefficient  $\tau_A$ . Toutefois, MM. Cahill, Gauvin et Johnson ont préparé un excellent ouvrage sur le sujet où ils démontrent que  $\tau_A$  peut s'exprimer de façon plus concise par l'équation 4.10.1. De plus, ils attribuent des valeurs au coefficient en fonction de conditions diverses. Certaines de ces valeurs sont indiquées au tableau 4.10.1. où l'angle  $\psi$  hypothétique est zéro.

$$\tau_A = \tau_{Abs} \times \tau_{SR} (1+G) (\cos \psi + \rho M) \quad - 4.10.1$$

où  $\tau_A$  = coefficient numérique de transmission requis, sans dimension;

$\tau_{Abs}$  = facteur comprenant les effets de l'absorption de la chaleur dans l'atmosphère, sans dimension;

$\tau_{SR} (1+G) (\cos \psi + \rho M)$  = facteur comprenant les effets de la diffusion de la chaleur par des particules en suspension dans l'air, et de la réflexion diffusée, à l'intérieur d'un plan Lambert, sans dimension;

$G$  = facteur d'intensification résultant de la diffusion, sans dimension;

$\rho$  = albédo de la zone ciblée, sans dimension;

$\rho M$  = fraction de chaleur reçue directement sous forme de chaleur réfléchie par diffusion, à l'intérieur d'un plan Lambert, sans dimension;

$\psi$  = angle se situant entre le rayon de la chaleur directe et la normale de la surface réfléchissante.

4.11 On peut dès lors poser à nouveau les équations 3.9.1, 3.9.2, et 3.10.2 respectivement comme suit: 4.11.1, 4.11.2 et 4.11.3. On pourra attribuer à  $\tau_A$  certaines valeurs en se basant sur le tableau 4.10.1.



SURFACE DU SOL	ALTITUDE À LAQUELLE SE PRODUIT L'EXPLOSION, EN PIEDS	VISIBILITÉ EN MILLE	COEFFICIENTS DE TRANSMISSION $\tau_A$								
			RAYON HORIZONTAL EN PIEDS								
			0	10,000	20,000	30,000	40,000	50,000	60,000	70,000	80,000
Sans neige	5,000	2	0.53	0.20	0.05	0.01					
Sans neige	30,000	2	0.19	0.16	0.13	0.10	0.07	0.05	0.04	0.02	
Sans neige	5,000	10	0.90	0.75	0.50	0.32	0.23	0.16	0.10	0.08	0.06
Sans neige	30,000	10	0.64	0.58	0.54	0.48	0.44	0.38	0.34	0.29	
Enneigée	5,000	10	1.05	1.12	0.80	0.50	0.30	0.20	0.15	0.10	0.06
Enneigée	30,000	10	0.58	0.56	0.51	0.47	0.43	0.37	0.33	0.30	
Enneigée	5,000	50	1.05	1.40	1.40	1.25	1.06	0.92	0.78	0.68	0.63
Enneigée	30,000	50	0.78	0.73	0.68	0.63	0.60	0.57	0.54	0.52	0.43
Sans neige	0	2	0.58	0.13	0.02	0.01					
Sans neige	0	10	0.90	0.64	0.35	0.19	0.11	0.07	0.04		
Enneigée	0	50	1.0	0.90	0.75	0.63	0.54	0.47	0.42	0.38	

Tableau 4.10.1 COEFFICIENTS DE TRANSMISSION,  $\tau_A$  EN FONCTION DE DIVERSES CONDITIONS ATMOSPHERIQUES ET DE LA SURFACE SU SOL.

$$Q = \tau_A \times \frac{W \times 10^8}{4.51 \times R^2} \quad - 4.11.1$$

$$P = \tau_A \times \frac{2 \times 10^{14}}{WR^2} \times t^3 \times e^{\frac{-93.75t}{\gamma W}} \quad - 4.11.2$$

$$P_p = \tau_A \times 3.4 \times 10^8 \times \frac{\sqrt{W}}{R^2} \quad - 4.11.3$$

où  $\tau_A$  = le coefficient indiqué au tableau 4.10.1

et les autres signes sont ceux indiqués aux équations 3.9.1, 3.9.2, et 3.10.2.

4.12 Bien que les équations de base correspondant à l'énergie et à la puissance sont maintenant plus conformes à des conditions réelles de transmission dans l'atmosphère que celles figurant aux alinéas 3.9 et 3.10, elles omettent certains effets importants qui seront étudiés au chapitre 5.

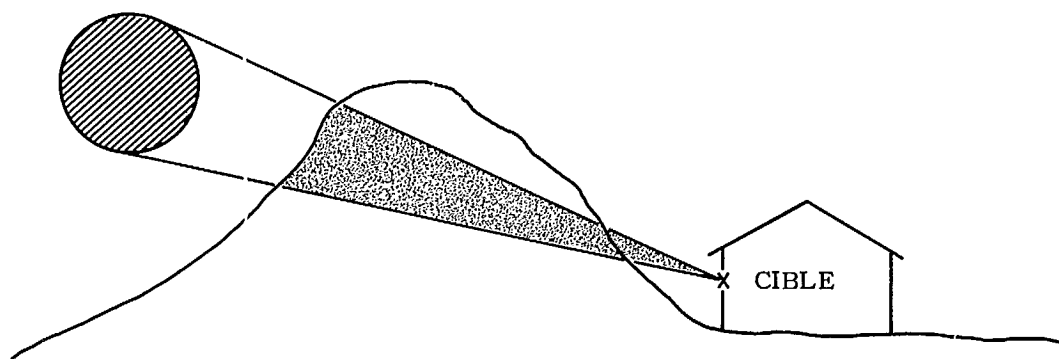


FIG. 5.2.1.e BOULE DE FEU TOTALEMENT CACHÉE PAR UN OBSTACLE

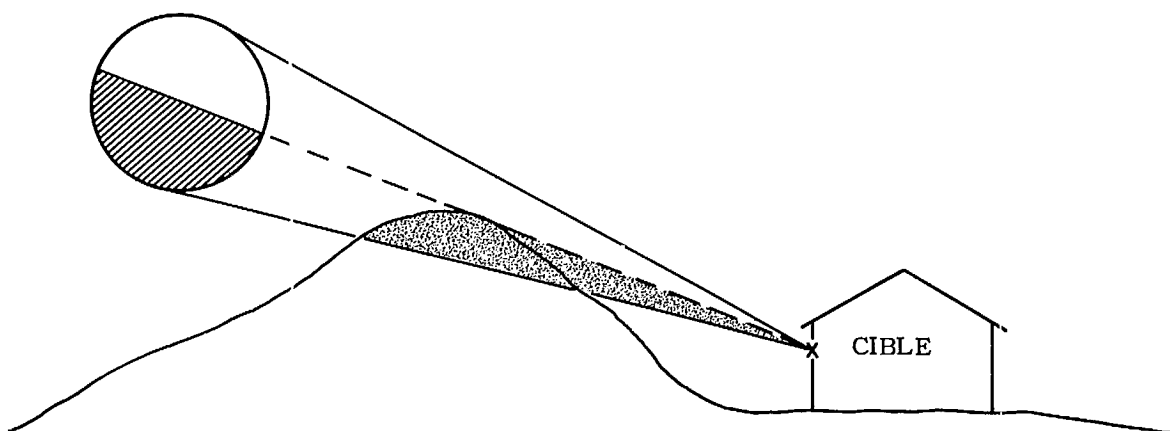


FIG. 5.2.1.b BOULE DE FEU À DEMI CACHÉE PAR UN OBSTACLE

## CHAPITRE 5

### ÉFFETS DE LA TOPOGRAPHIE SUR LE DÉGAGEMENT DE LA CHALEUR

5.1 Au chapitre 4, nous avons étudié les mécanismes relatifs à la transmission de la chaleur dans l'atmosphère. Pour simplifier, nous avons supposé qu'il n'y avait aucun obstacle naturel ou artificiel entre la source d'énergie et tout point de la cible arbitrairement désigné. Puisque la chaleur en provenance d'une arme nucléaire se comporte à peu près comme les rayons lumineux visibles (en fait, les radiations lumineuses visibles constituent une forte proportion de l'énergie thermique libérée), il est évident que même de légers écrans opaques peuvent fournir une protection efficace contre la chaleur. L'hypothèse peut donc entraîner des erreurs moins grossières dans la détermination des cibles, là où des immeubles, des collines et des arbres protègent une propriété contre les pleins effets d'une arme nucléaire.

5.2 Supposons par exemple, qu'une cible soit abritée par une colline; si l'on fait détoner une arme de façon que la boule de feu soit hors du champ de vision, on peut alors conclure qu'aucun rayon calorifique n'atteindra directement la cible. Il se dégagera probablement aussi moins de chaleur par diffusion et par réflexion au sol. Si d'autre part, on voit de la cible la moitié de la boule de feu, on peut supposer qu'environ la moitié de la chaleur radiante totale se dégagera. Un diagramme illustre ces réactions, à la figure 5.2.1. On a donné une colline comme exemple d'obstacle; ce pourrait tout aussi bien être un mur, un immeuble, des arbres, du feuillage ou une autre substance opaque.

5.3 On pourra objecter que des obstacles artificiels comme des immeubles et des obstacles naturels légers comme des arbres, n'ont aucune valeur puisqu'ils peuvent être supprimés par le choc de l'explosion. Une telle objection est fautive pour deux raisons. La première est que l'explosion ne sera peut-être pas assez forte pour détruire complètement les obstacles. Il est aussi possible que l'effondrement des obstacles soit suffisamment retardé pour préserver l'intégrité de l'écran protecteur pendant qu'une quantité importante de la chaleur se dégage. La deuxième est que la vague de souffle n'endommagera peut-être pas les obstacles avant qu'une bonne partie des impulsions thermiques ne se soient répandues. Il est difficile de dire quel effet peut être le plus important. On peut toutefois facilement démontrer ce dernier effet. La figure 5.3.1 indique les moments d'arrivée des têtes de choc, à différentes distances du point zéro et les moments où la puissance thermique atteint le point maximum (voir l'équation 3.10.1), après la détonation, à 5,000 pieds d'altitude, d'armes libérant une énergie de 100 kilotonnes, de 1 mégatonne, de 5 mégatonnes et de 10 mégatonnes. Le tableau indique qu'à mesure que la distance s'accroît, l'écart entre l'arrivée de la tête de choc et le moment où l'effet thermique atteint son intensité maximum s'accroît. Cet effet est plus marqué pour les armes qui libèrent de faibles quantités d'énergie. L'exemple qui suit indique comment on peut se servir du tableau.

Exemple	Un immeuble est situé à 10,000 pieds du point zéro d'une arme qui libère une énergie totale de 1 mégatonne lorsqu'elle éclate à 5,000 pieds d'altitude. Une épaisse forêt d'arbres feuillus entoure l'immeuble. On veut savoir si la forêt protégera la maison contre la chaleur avant l'arrivée du souffle.
---------	--

Solution	Consulter le tableau 5.3.1, à la colonne 10,000 pieds, vis-à-vis de 1 mégatonne. L'arrivée de la tête de choc se produit à 5,5 secondes.
----------	--

ÉNERGIE TOTALE LIBÉRÉE PAR L'ARME	TEMPS EN SECONDES ENTRE LA DÉTONATION ET LA PUISSANCE THERMIQUE MAXIMUM	MOMENT DE L'ARRIVÉE DE LA VAGUE DE SOUFFLE DISTANCE DU POINT ZÉRO, EN PIEDS							
		1,000	4,000	7,000	10,000	13,000	16,000	19,000	30,000
100 kilotonnes	0.3	2.3	3.3	5.6	7.4	10.2	12.5	15.1	24.1
1 mégatonne	1.0	1.5	2.3	3.7	5.5	7.2	10.0	12.0	22.5
5 mégatonnes	2.3	0.9	1.4	2.3	3.8	5.5	7.2	9.1	17.1
10 mégatonnes	3.2	0.9	1.3	2.1	3.0	4.7	6.3	8.2	15.9

Tableau 5.3.1 UNE COMPARAISON ENTRE L'ARRIVÉE DES ONDES DE CHOC ET LE MOMENT  
OÙ LA PUISSANCE THERMIQUE ATTEINT LE POINT MAXIMUM, APRÈS UNE DÉTONATION D'ARMES DE  
100 KILOTONNES, 1, 5 ET 10 MÉGATONNES À UNE ALTITUDE DE 5,000 PIEDS.

Consulter la colonne "Temps en secondes entre la détonation et la puissance thermique maximum".

Le temps écoulé est de 1,0 seconde.

La puissance thermique maximum précède donc de beaucoup l'arrivée de la tête de choc.

On en conclut que les arbres constituent une protection importante contre les effets thermiques de l'explosion.

Réponse

Cet exemple démontre que des obstacles aussi légers que des feuilles peuvent vraisemblablement résister assez longtemps pour arrêter efficacement la chaleur qui se concentrerait autrement à la surface de l'immeuble. On traite des effets thermiques sur les feuilles elles-mêmes au chapitre 11.

5.4 Jusqu'à présent, nous nous sommes bornés à discuter de l'effet d'"ombre" des obstacles extérieurs. On peut toutefois élargir la portée de l'argument de façon à y inclure les murs d'immeubles à l'intérieur desquels se trouvent des matières combustibles. Supposons, par exemple, qu'il y ait du papier dans une pièce d'une maison située à une certaine distance du point de détonation d'une arme nucléaire. Pour que le papier reçoive directement la chaleur irradiée par l'explosion, la ligne de visée entre le papier et la boule de feu doit être libre. Ceci fait ordinairement supposer qu'il n'y a qu'une fenêtre entre la source de chaleur et le papier-cible et qu'aucun mur ou cloison opaque n'obstrue la vue. La figure 5.4.1 indique quelques variations possibles dans la portion de la boule de feu qu'on peut voir de la cible.

5.5 A la figure 5.4.1(a), on peut voir toute la boule de feu à travers une fenêtre et le papier peut recevoir directement toute la chaleur radiante. A la figure 5.4.1(b), on ne voit qu'un quart de la boule de feu car un mur extérieur en cache le reste. On peut donc logiquement en conclure qu'en fait, un quart seulement du total des radiations directes se concentreront à la surface du papier. A la figure 5.4.1(c), la boule de feu est beaucoup plus près de la maison. Néanmoins, de la cible on n'en voit que la moitié et il n'y a donc que la moitié du total des radiations thermiques qui se dégagent. A la figure 5.4.1(d), un mur masque complètement la boule de feu. Aucune chaleur ne peut donc atteindre directement le papier cible. S'il y a des obstacles extérieurs, il faut alors ajouter leurs effets à ceux qui proviennent de la forme de la pièce. Malheureusement, bien qu'on puisse estimer assez facilement la diminution des radiations directes due à des obstacles thermiques, il n'existe pas de méthode comparable pour évaluer les effets d'une ombre sur les rayons diffus et réfléchis. Dans la plupart des régions urbaines, la quantité et la variété des surfaces réfléchissantes empêchent ordinairement de faire la moindre estimation de la diminution de la chaleur réfléchie. Il est toutefois logique de supposer que les obstacles extérieurs et les murs des immeubles diminuent quelque peu la quantité de chaleur diffuse et de chaleur réfléchie. Bien que ce ne soit pas nécessairement exact, la méthode la plus simple est de supposer que la proportion de la chaleur totale réellement fournie à la cible, en provenance de sources directes de radiations diffuses ou réfléchies, par rapport à la chaleur totale en provenance de toutes les sources qui peuvent atteindre la cible s'il n'y a pas d'obstacles, est égale à la proportion de la surface apparente de la boule de feu visible de la cible par rapport à la surface

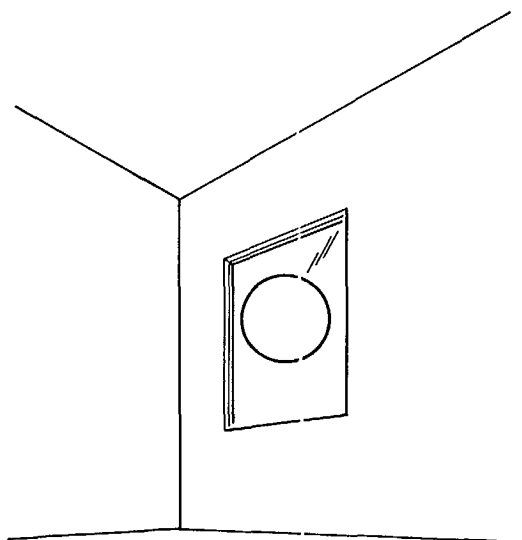


FIG. 5.4.1.a. TOUTE LA BOULE DE FEU EST VISIBLE

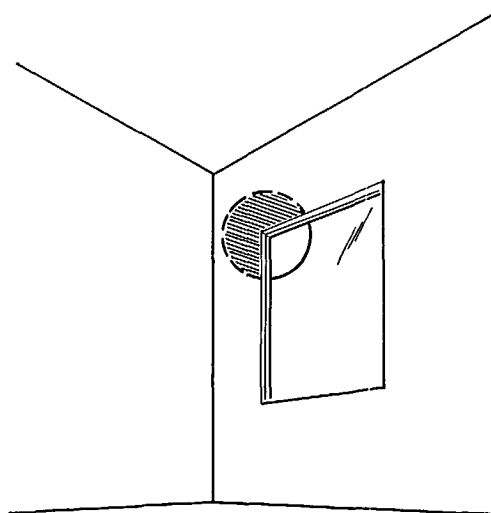


FIG. 5.4.1.b. UN QUART DE LA BOULE DE FEU EST VISIBLE

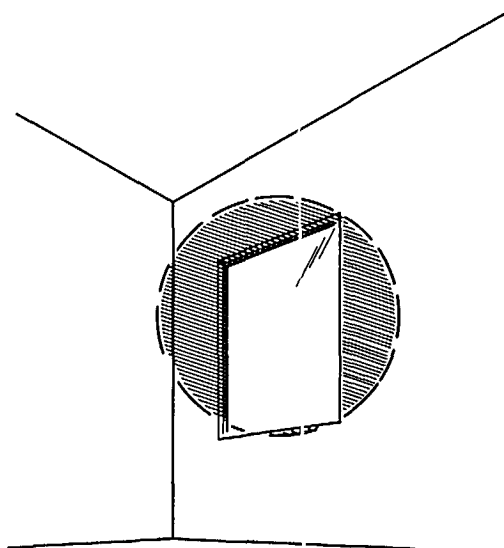


FIG. 5.4.1.c. LA BOULE DE FEU EST PLUS PROCHE, MAIS LA MOITIÉ SEULEMENT EN EST VISIBLE

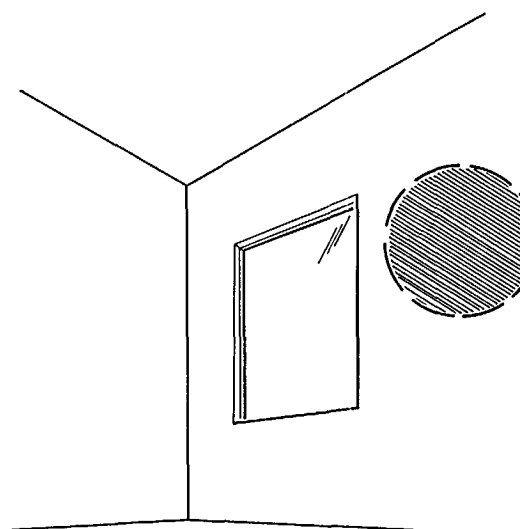


FIG. 5.4.1.d. LA BOULE DE FEU EST COMPLÈTEMENT MASQUÉE PAR UN OBSTACLE

FIG. 5.4.1. PORTIONS VISIBLES DE LA BOULE DE FEU, VUES D'UN COMBUSTIBLE SITUÉ DANS UNE PIÈCE



apparente lorsqu'il n'y a pas d'obstacle. L'équation 5.5.1 exprime cette relation d'une façon plus concise.

$$\frac{Q_{\text{fournie}}}{Q_{\text{disponible}}} = \frac{A_{\text{fourni}}}{\pi \times \text{Rayon}_p^2} \quad - 5.5.1$$

où  $Q_{\text{fournie}}$  = quantité de chaleur réellement fournie à la cible

$Q_{\text{disponible}}$  = quantité de chaleur disponible à une cible lorsqu'il n'y a pas d'obstacles

$A_{\text{fournie}}$  = surface apparente de la boule de feu visible de la cible

$\text{Rayon}_p$  = rayon de la boule de feu au moment où la puissance thermique est au point maximum (Voir l'équation 3.10.2)

On expliquera le terme " $\text{Rayon}_p$ " à l'alinéa 5.7.

5.6 Aux termes de l'équation 5.5.1, on peut dire que si l'on connaît le point de détonation d'une arme ou si on le prévoit, il est possible, en établissant le rapport de visée entre la matière combustible et l'explosion, de déterminer la mesure dans laquelle la matière en question sera exposée à la chaleur dégagée. On a adopté au cours d'une enquête sur les foyers d'incendies menée à Boston et Détroit<sup>1</sup>, l'une des meilleures techniques pour évaluer la surface apparente d'une boule de feu visible d'une cible. Pour ce faire, on a pris, d'un foyer d'incendie ordinairement mais pas nécessairement situé à l'intérieur, une photographie en direction du centre d'une boule de feu hypothétique.

On voit naturellement sur la photo, les obstacles intermédiaires qui s'opposent au cheminement des radiations directes. Tout en tenant compte de l'échelle on peut poser sur l'épreuve photographique la reproduction de la boule de feu dont on aura évalué la grosseur et déduire en mesurant quelle portion de la boule de feu est visible par rapport à sa surface totale.

5.7 Il est ordinairement assez précis de ne considérer la boule de feu qu'au moment où elle dégage sa puissance thermique maximum, c'est-à-dire, conformément à l'équation 3.10.1,  $0.032\sqrt{W}$  secondes après la détonation. Le rayon de la boule de feu qui correspond à cette durée est donné approximativement à l'équation 5.7.1, et représenté graphiquement à la Figure 5.7.1.

$$\text{Rayon}_p = 180 W^{0.4} \quad - 5.7.1$$

lorsque  $\text{Rayon}_p$  = Rayon de la boule de feu,  $0.032\sqrt{W}$  secondes après la détonation

$W$  = Énergie totale de l'arme en kilotonnes

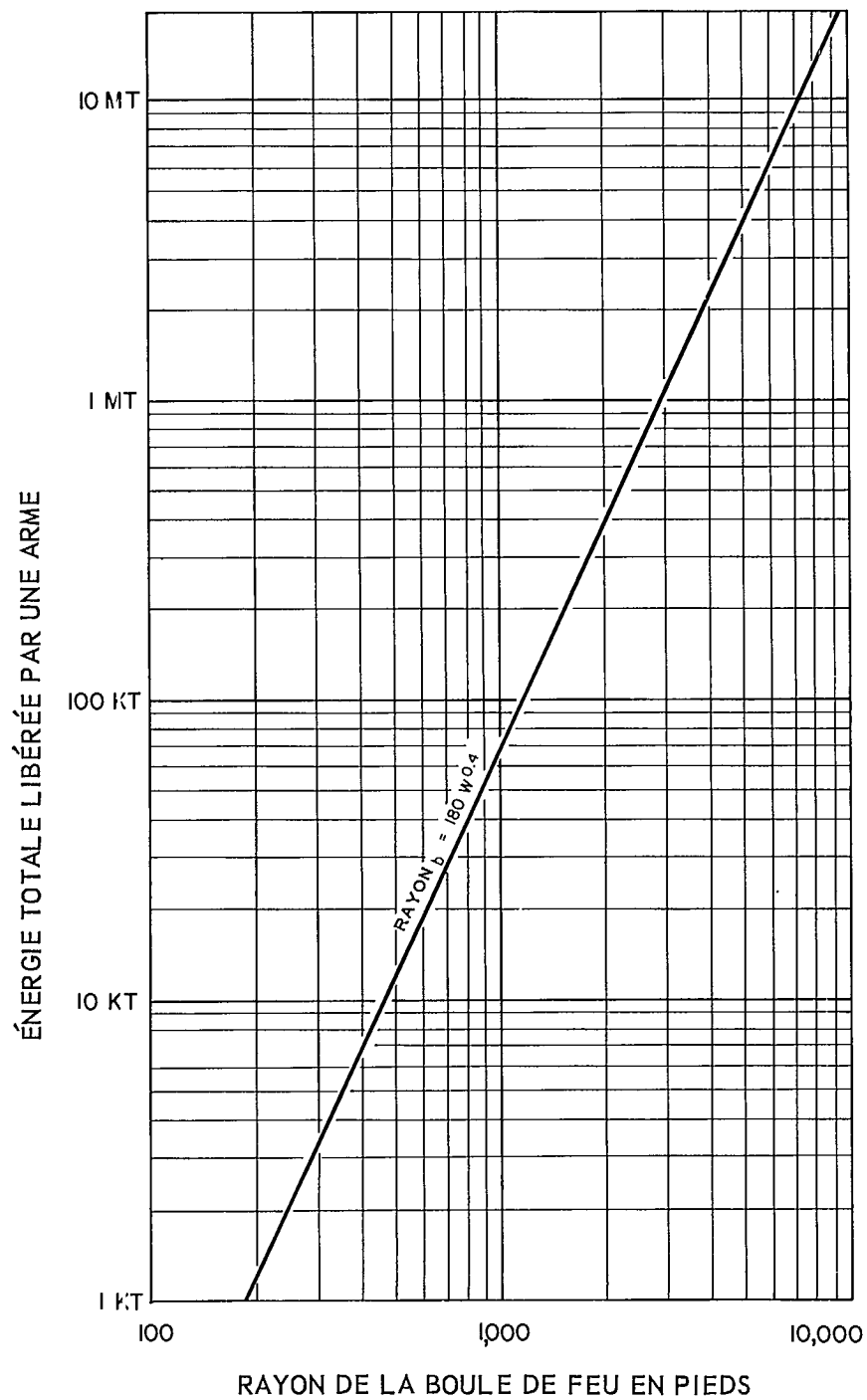


FIG. 5.7.1. RAYON DE LA BOULE DE FEU EN PIEDS LORSQUE LA PUISSANCE THERMIQUE EST LA PLUS INTENSE.

Dans l'intervalle qui sépare la détonation et l'obtention de sa puissance maximum, la boule de feu s'élève à une vitesse approximative de 400 pieds par seconde de sorte que son altitude au moment de sa puissance maximum est donnée par l'équation 5.7.2. Il est donc plus juste d'aligner l'appareil photographique sur le point correspondant au centre de la boule de feu qui s'est élevée.

$$\begin{array}{lcl} \text{Altitude de la boule} & = & \text{Altitude du point} \\ \text{de feu au moment de} & & \text{de détonation} + \\ \text{son dégagement maximum} & & (12.8 \times \sqrt{W}) \text{ pieds} \\ \text{de puissance thermique} & & \end{array} \quad - 5.7.2$$

où  $W$  = énergie totale dégagée par l'arme, en kilotonnes.

5.8 Pour plus de précision, il faut indiquer la croissance et le trajet de la boule de feu à partir du moment de la détonation, alors qu'en principe sa grosseur est de zéro, en passant par le moment de sa puissance maximum, jusqu'à ce que la boule de feu atteigne sa grosseur maximum (son rayon est alors supérieur d'environ 12 p. 100 à celui qui est indiqué à l'équation 5.7.1). Il vaut rarement la peine de passer par toutes ces étapes puisque la précision dans l'estimation de la vitesse d'ascension et la grosseur de la boule de feu ne garantissent pas la précision des calculs. Vous trouverez ci-dessous un exemple d'une méthode plus simple.

## 5.9 Exemple

Un plan de protection civile prévoit qu'on peut faire détoner une arme de 1 mégatonne au-dessus d'un point déterminé à une altitude de 5,000 pieds et à une distance de 20,000 pieds (si on mesure horizontalement), d'un bâtiment dans lequel sont entreposés des combustibles. Les combustibles se trouvent à 12 pieds d'un mur percé d'une fenêtre qui fait face au point de détonation. Il n'existe aucun obstacle extérieur à la chaleur. On demande d'évaluer la valeur de la protection contre la chaleur fournie par le mur de l'immeuble.

## Solution

On place un appareil photographique à l'endroit où sont les combustibles.

A l'aide d'un compas et d'une carte, on oriente l'appareil sur un plan horizontal de façon qu'il se trouve face à une ligne verticale imaginaire passant par le point de détonation hypothétique.

Aux termes de l'équation 5.7.2, on peut écrire

$$\begin{array}{lcl} \text{Altitude de la boule de feu} & & \\ \text{au moment de l'émission thermique maximum} & = & 5,000 + (12.8 \times \sqrt{1,000}) \\ & & \text{pieds} \\ & = & 5,400 \text{ pieds} \end{array}$$

A l'aide d'un rapporteur, on incline l'appareil photographique de façon qu'il forme un angle de tangence de  $\frac{5,400}{20,000}$ , c.à-d. de  $15.1^\circ$  sur le plan vertical.

On prend une photographie et l'on fait un trait au centre de l'épreuve pour indiquer le centre de la boule de feu.

Aux termes de l'équation 5.7.1 (ou de la Figure 5.7.1), on peut écrire:

$$\begin{aligned}\text{Rayon de la boule de feu} &= 180 \times 1,000^{0.4} \text{ pieds} \\ &= 2,850 \text{ pieds}\end{aligned}$$

Pour trouver le rayon de l'image de la boule de feu sur la fenêtre, on peut utiliser les rapports géométriques simples illustrés à la Figure 5.9.1.

$$\begin{aligned}\text{Rayon de l'image} &= X \times \text{Rayon}_p \\ &= \frac{\sqrt{H^2 + D^2}}{\sqrt{5,400^2 + 20,000^2}} \\ &= \frac{12 \times 2,850}{\sqrt{5,400^2 + 20,000^2}} \\ &= 1.65 \text{ pieds}\end{aligned}$$

On compare la grandeur réelle de la fenêtre aux grandeurs correspondantes mesurées sur la photographie afin d'établir une échelle.

On trace un cercle dont le rayon à l'échelle mesure 1.65 pied et dont le centre correspond au centre de la photographie.

Le diagramme de la figure 5.9.2 illustre le résultat ainsi obtenu.

$$\begin{aligned}\text{Surface de l'image de la boule de feu} &= \pi \times 1.65^2 \text{ pi. car.} \\ &= 8.6 \text{ pieds carrés}\end{aligned}$$

On peut mesurer au planimètre la surface du cercle "visible" de l'appareil photographique, en comptant les carreaux sur un morceau superposé de papier quadrillé transparent ou en se servant de méthodes trigonométriques.

Appliquons les méthodes de la trigonométrie à la figure 5.9.2.

$$\text{Fraction invisible de l'image} = \frac{A_1 + A_2 - A_{12}}{8.6}$$

$$\begin{aligned}\text{où } A_1 &= \frac{1}{2} \times \text{Rayon}^2 (\theta_1 - \sin \theta_1) \\ &= \frac{1}{2} \times \frac{1.65^2 (148 \times \pi - \sin - 148^\circ)}{180} \\ &= 2.8 \text{ pieds carrés}\end{aligned}$$

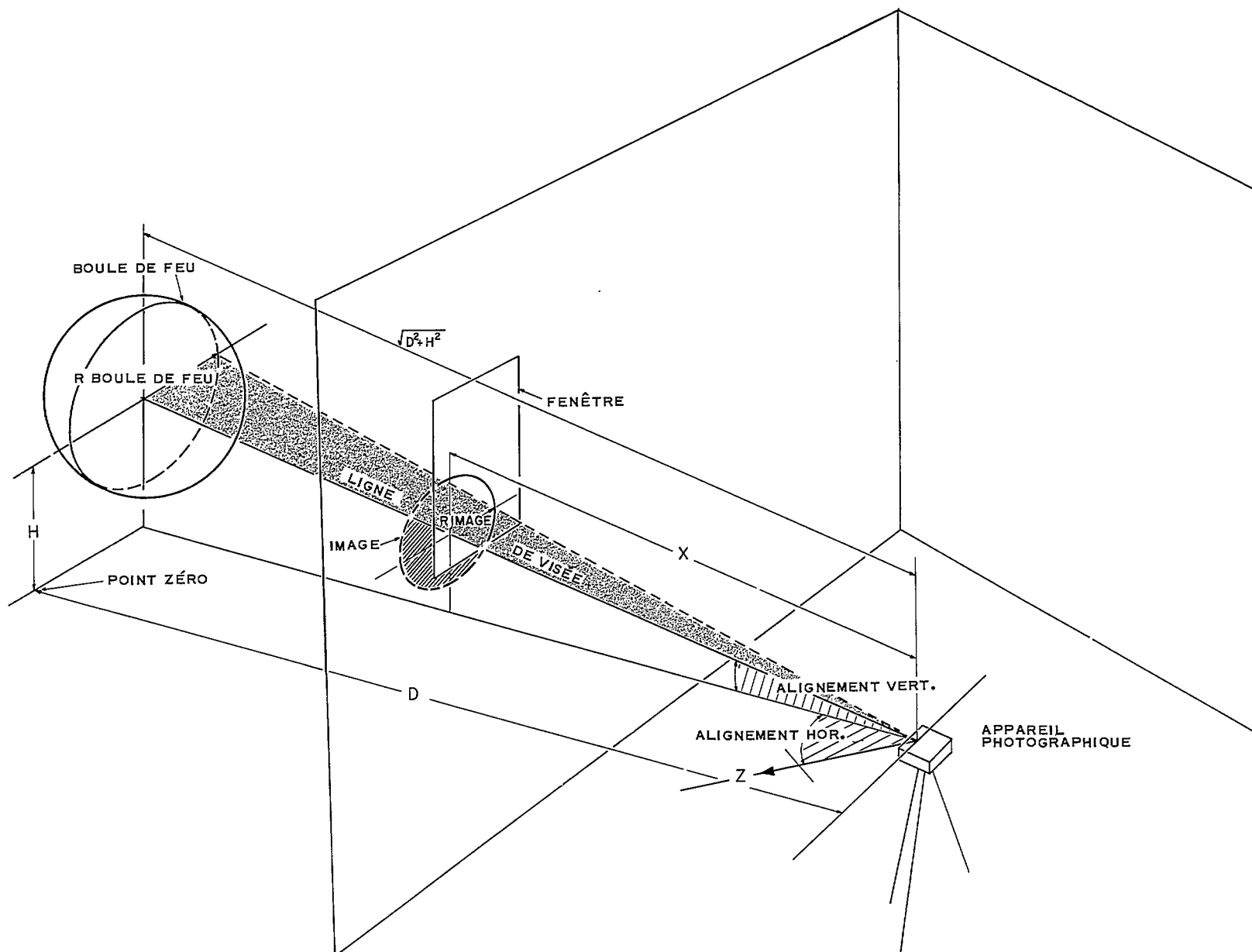


FIG. 5.9.1. ALIGNEMENT DE L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE ET RELATION ENTRE L'IMAGE ET LA BOULE DE FEU.

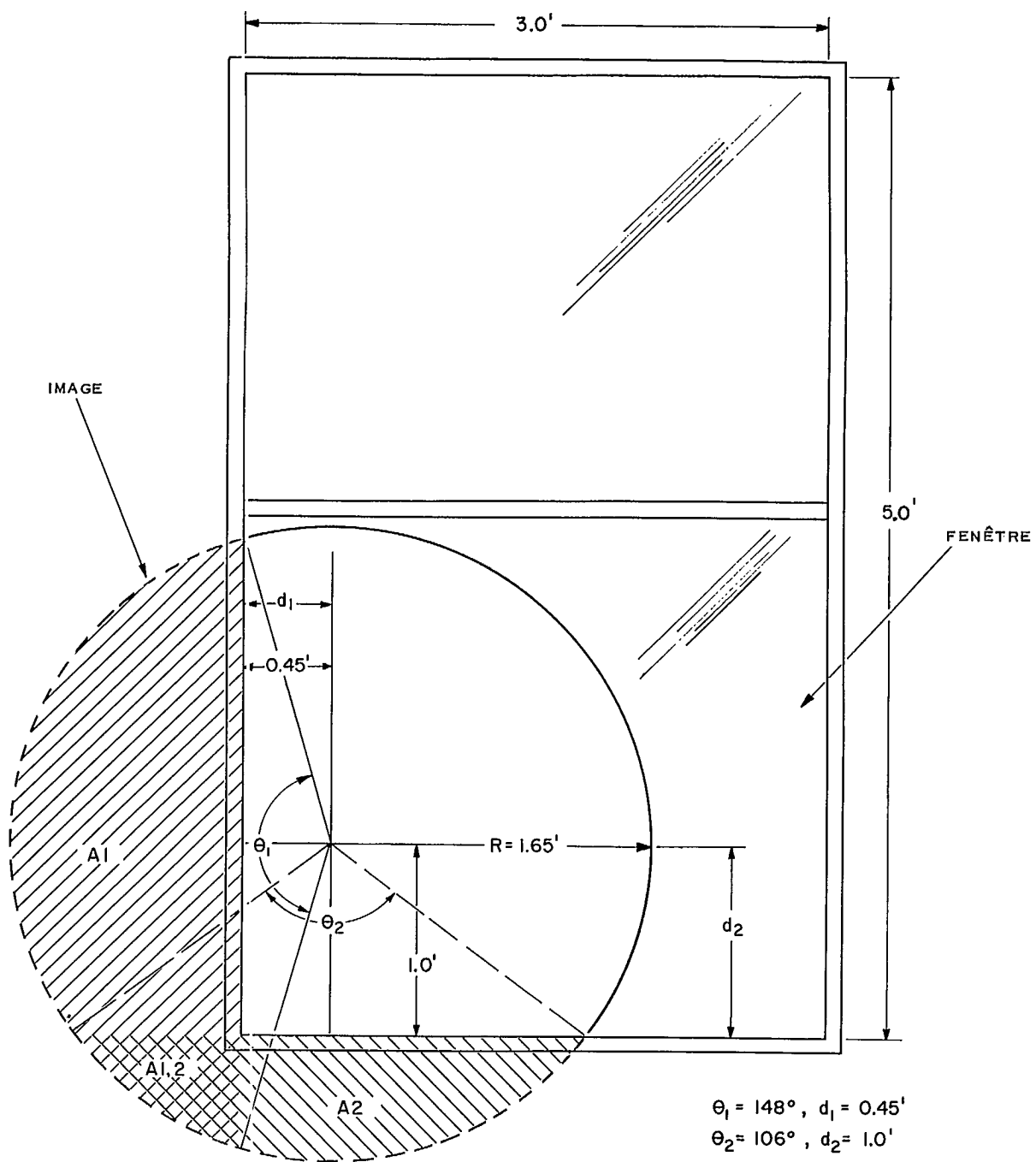


FIG. 5.9.2. IMAGE DE LA BOULE DE FEU VUE PAR L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE AU MOMENT OÙ LES RADIATIONS SONT LES PLUS INTENSES. LES RÉGIONS OMBRÉES REPRÉSENTENT LA PARTIE INVISIBLE DE L'IMAGE.

$$\text{De même } A_2 = \frac{1}{2} \times 1.65^2 \left( \frac{106}{180} \times \pi - \sin 106^\circ \right)$$

$$= 1.2 \text{ pied carré}$$

$$\text{et } A_{12} = \frac{1}{2} \times \text{Rayon}^2 \times \left( 1 - \cos \frac{\theta_1}{2} \right) \left( 1 - \cos \frac{\theta_2}{2} \right)$$

(En supposant que  $A_{12}$  est presque un triangle)

$$= 0.3 \text{ pied carré}$$

$$\text{Fraction invisible de l'image} = \frac{2.8 + 1.2 - 0.3}{8.6}$$

$$= 0.43$$

$$\therefore \text{Fraction visible} = 0.57$$

Il n'y a donc que 57 p. 100 de la chaleur disponible qui est fournie aux combustibles. On peut tracer un diagramme de l'intensité thermique par rapport au temps s'il n'y a pas d'obstacle à la chaleur et si seulement 57 p. 100 de la puissance disponible atteint les combustibles.

C'est ce qu'on a illustré à la figure 5.9.3 en se fondant sur l'équation 4.11.2 et en supposant pour simplifier, que  $T_A = 1$ .

Réponse

5.10 L'explication et l'exemple qui précèdent prouvent qu'il faut apporter une autre modification qui s'ajoutera à celles qui sont dues aux effets de la transmission dans l'atmosphère dont on a parlé au Chapitre 4. On a démontré dans l'exemple, qu'en ce qui concerne l'ensemble particulier des conditions posées, l'intensité et par conséquent, l'énergie fournie aux combustibles ne constituait que 57 p. 100 de l'énergie disponible lorsqu'il n'y avait pas d'obstacle. Puisqu'on peut adopter une méthode semblable pour n'importe quel ensemble de conditions, on appréciera certainement de pouvoir appliquer un coefficient d'une valeur numérique positive inférieure à l'unité, aux équations 4.11.1, 4.11.2 et 4.11.3 afin de tenir compte de la protection que constituent les obstacles. On peut donc récrire ces équations en leur donnant la même forme que les équations 5.10, 5.10.2 et 5.10.3.

$$Q = T_A \times T_B \times \frac{W \times 10^8}{4.51 R^2} \quad - 5.10.1$$

$$P = T_A \times T_B \times \frac{2 \times 10^{14}}{WR^2} \times t^3 \times e^{\frac{-93.75 t}{\sqrt{W}}} \quad - 5.10.2$$

$$P_p = T_A \times T_B \times 3.4 \times 10^8 \times \frac{\sqrt{W}}{R^2} \quad - 5.10.3$$



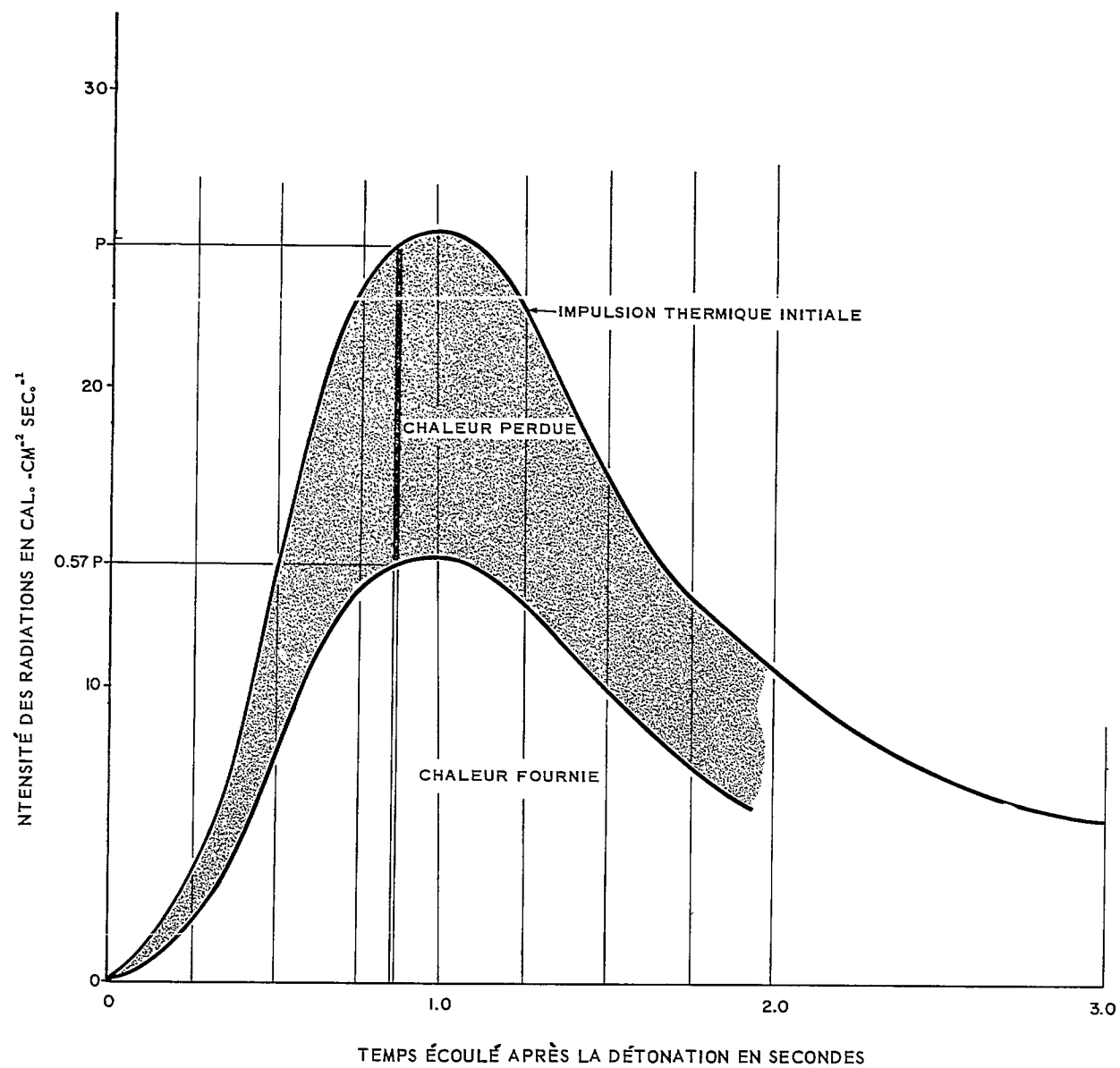


FIG. 5.9.3. DIAGRAMMES REPRÉSENTANT L'IMPULSION THERMIQUE INITIALE ET DE DÉCHARGE POUR UNE ARME DE 1 MÉGATONNE, QUI ÉCLATE À 20,000 PIEDS DE DISTANCE ET À 5.000 PIEDS D'ALTITUDE; 57 p. 100 VISIBLE.

Où  $\tau_B =$  Coefficient de valeur  $0 < \tau_B < 1$  représentant la fraction du total de la surface projetée de la boule de feu visible d'une cible (voir l'exemple de méthode de détermination au chapitre 5).

et  $\tau_A =$  Coefficient donné au tableau 4.10.1

et les autres symboles sont tels qu'on les a donnés dans les équations 3.9.1, 3.9.2 et 3.10.2.

5.11 Il existe un autre effet important qui peut réduire la chaleur pénétrant dans un immeuble. Il s'agit de la perte résultant de la présence de vitres ou de moustiquaires dans les portes ou fenêtres. Lorsque la chaleur en provenance d'une arme nucléaire atteint la vitre d'une fenêtre, une partie de cette chaleur est réfléchiée ou absorbée tandis que le reste est transmis à l'intérieur de l'immeuble. S'il s'agit de rayons incidents normaux par rapport au plan de la vitre ou de la moustiquaire, il y a transmission maximum de chaleur. A mesure que les rayons incidents se rapprochent de plus en plus d'une ligne parallèle par rapport à la vitre ou à la moustiquaire, la transmission de la chaleur diminue. Dans une certaine mesure, les pertes par réflexion dépendent des légères imperfections de la surface, par suite d'un défaut de fabrication du verre. En d'autres termes, une surface légèrement ondulée affecte les caractéristiques de la réflexion. On a cependant étudié la transmission de la chaleur provenant d'armes nucléaires, relativement au phénomène d'incidence, avec verre à vitre simple (genre communément employé au Canada), en le combinant de diverses façons avec des moustiquaires. Les résultats<sup>2</sup> obtenus sont indiqués au tableau 5.11.1. Les valeurs données dans le tableau représentent la fraction de chaleur incidente qui traverse réellement la vitre et se répand à l'intérieur de l'immeuble.

5.12 Pour les cibles combustibles situées à l'intérieur d'un immeuble, il faut donc apporter une autre modification aux équations relatives au dégagement de puissance et d'énergie si l'on veut tenir compte des pertes à la fenêtre. On doit toutefois se rappeler que de telles pertes se produisent lorsqu'une partie importante du dégagement thermique précède l'arrivée de la tête de choc (voir l'alinéa 5.3). Néanmoins, il est préférable d'écrire les équations 5.10.1, 5.10.2 et 5.10.3 sous la même forme que les équations 5.12.1, 5.12.2 et 5.12.3. Aux fins du présent rapport, ces relations s'énoncent ainsi:

$$Q = \tau_A \times \tau_B \times \tau_W \times \frac{W \times 10^8}{4.51 R^2} \quad -5.12.1$$

$$P = \tau_A \times \tau_B \times \tau_W \times \frac{2 \times 10^{14}}{WR^2} \times t^3 \times e^{\frac{-93.75 t}{\sqrt{W}}} \quad -5.12.2$$

$$P_P = \tau_A \times \tau_B \times \tau_W \times 3.4 \times 10^8 \times \frac{\sqrt{W}}{R^2} \quad - 5.12.3$$

où  $\tau_A$  = coefficient donné au tableau 4.10.1

$\tau_B$  = coefficient de valeur  $0 < \tau_B < 1$ , , représentant une fraction du total de la surface projetée de la boule de feu visible du matériel-cible (voir l'exemple de méthode de détermination à l'alinéa 5.9).

$\tau_W$  = coefficient donné au tableau 5.11.1.

représentent la forme définitive des équations relatives à la puissance et l'énergie qui peuvent s'appliquer aux armes éclatant à des altitudes inférieures à 100,000 pieds. On doit bien se rappeler qu'elles ne constituent rien de plus que des approximations et que l'on doit les utiliser en conséquence.

COMBINAISONS VITRE-MOUSTIQUAIRE DANS UNE FENÊTRE	COEFFICIENT DE TRANSMISSION $\tau_W$
Ni vitre, ni moustiquaire	1.00
Moustiquaire simple	0.67
Vitre simple	0.56
Vitre simple, moustiquaire simple	0.37
Vitre double	0.31
Vitre double, moustiquaire simple	0.21

Tableau 5.11.1 COEFFICIENT DE TRANSMISSION  $\tau_W$   
POUR LA CHALEURIRRADIÉE À TRAVERS LA VITRE ET LA MOUSTIQUAIRE<sup>2</sup> D'UNE FENÊTRE

## CHAPITRE 6

### COMBUSTIBLES ET COMBUSTIBILITÉ

6.1 Dans les chapitres qui précèdent, nous avons expliqué le dégagement de chaleur en provenance d'armes nucléaires; nous devons maintenant tenter de relier ces constatations à la formation d'incendies et par conséquent, établir les limites de la distance du point zéro à l'intérieur desquelles l'incendie peut causer des dommages considérables. A titre de mesure préliminaire, il semble logique d'indiquer quels sont les combustibles qui déterminent en fait l'étendue de la zone à l'intérieur de laquelle peuvent se produire les incendies primaires (c.-à-d. les incendies provoqués directement par les radiations thermiques d'une arme).

6.2 Chacun sait que les combustibles peuvent être gazeux (le méthane, par exemple), liquides (comme l'essence ou solides comme le bois), et que certains s'enflamment plus rapidement que d'autres. La plupart des combustibles qui s'enflamment avec violence sont ordinairement bien protégés contre les sources occasionnelles de chaleur ou contre les flammes. Par exemple, on entrepose ordinairement l'essence dans des réservoirs souterrains aux stations-service et le gaz naturel est acheminé dans des conduits enfouis sous une épaisse couche de terre. Si l'on ne perd donc pas de vue qu'une matière opaque atténue rapidement la chaleur émise par une arme nucléaire, on peut conclure que les combustibles qui s'enflamment le plus facilement ne constituent pas nécessairement un plus grand risque. De plus, dans le cas des liquides, la chaleur qui se concentre sur une surface, se "dilue" dans le volume total et si le volume est considérable, l'élévation de température qui en résulte est minime. En général, à mesure que la distance du point de détonation augmente, il devient de moins en moins probable que les combustibles liquides et gazeux les plus courants contribuent de façon importante au nombre des incendies primaires.

6.3 Le risque d'incendie est souvent plus grand lorsque les combustibles sont exposés à la chaleur radiante. Le groupe le plus important et le plus considérable de combustibles solides est sans contredit constitué de matières cellulosiques parmi lesquelles les plus connues sont le bois, le papier, les feuilles, l'herbe, le coton, le lin, la rayonne et de nombreux plastiques. Ce groupe comprend une telle variété de formes et de caractéristiques possibles qu'on peut supposer que toutes ne présentent pas le même degré d'inflammabilité ni le même pouvoir de combustion. Les seuls combustibles qui présentent quelque intérêt sont ceux qu'on trouve communément à profusion, qui s'enflamment facilement et entretiennent l'incendie. Les règles simples que propose le professeur G.I. Finch peuvent faciliter la sélection. Ces règles partagent les combustibles solides en trois catégories qui relient la forme du combustible à sa propension à s'enflammer.

6.4 Si la définition du terme surface spécifique désigne la surface totale en centimètres carrés, par gramme du poids d'un solide, on peut alors énoncer les règles de Finch de la façon suivante.

**Matière très inflammable** (comme de l'amadou) Un combustible solide dont la surface spécifique n'excède pas 20 centimètres carrés par gramme, qu'on peut allumer avec une allumette et qui continuera de brûler après qu'on aura retiré l'allumette. On peut donner en exemple le papier, le carton et les textiles cellulosiques.

**Bois d'allumage** Un combustible solide dont la surface spécifique varie de 2 centimètres carrés par gramme à 20 centimètres carrés par gramme. Le bois d'allumage ne s'enflamme et ne brûle que si on y mélange une quan-

tité suffisante de papier ou autre matière inflammable pour entretenir la combustion. Le contre-plaqué de ½ pouce d'épaisseur est un bois d'allumage.

**Combustible lourd**

Un combustible solide dont la surface spécifique est inférieure à 2 centimètres carrés par gramme et qui a une épaisseur minimum de ½ pouce. Il faut ajouter aux combustibles lourds du bois d'allumage enflammé pour qu'ils commencent à brûler et pour entretenir la combustion.

6.5 Bien que les règles énoncées précédemment aient d'abord été appliquées aux incendies ordinaires d'immeubles, on peut également les appliquer aux cas limites de la zone primaire d'incendie. (Plus près du point zéro, la chaleur radiante peut être telle qu'elle rend inutile la présence de papier ou autre matière très inflammable et peut-être même de bois d'allumage pour enflammer les combustibles massifs). On peut en conclure que le papier, le carton, les textiles celluloseux etc. sont parmi les matières qui s'enflamment le plus facilement. Etant donné qu'il existe une grande variété de matières très inflammables, il faut nécessairement choisir celles qu'on trouve en quantité dans la plupart des régions. Il est peu avantageux de choisir le cellulose par exemple, bien qu'il soit très inflammable, car il est peu probable que de nombreux immeubles en contiennent aux endroits exposés aux effets thermiques d'une arme nucléaire. On peut donc supposer que le feuillage, le papier et les textiles sont les matières inflammables les plus répandues.

6.6 L'incendie de matières très inflammables présente ordinairement peu d'intérêt à moins qu'elles ne se trouvent à un endroit où elles peuvent enflammer le bois d'allumage qui, à son tour, peut faire prendre feu aux combustibles lourds. On ne peut certes pas affirmer que tout incendie de cette nature occasionne d'importantes pertes matérielles; néanmoins, à cause du milieu ambiant, certaines matières inflammables peuvent plus que d'autres, provoquer des incendies importants. Ainsi, en dépit de leur profusion, les feuilles ne sont pas tellement inflammables sauf lorsqu'elles sont sèches ou mortes. La plupart du temps, elles brûlent mal et n'entretiennent pas la combustion. De plus, comme dans les régions urbaines, elles ne sont pas toujours à proximité de bois d'allumage ou de combustibles massifs elles ne constituent pas un grand danger. D'autre part, on trouve ordinairement à l'intérieur des immeubles, du papier et des textiles. A l'intérieur, ils sont non seulement beaucoup plus près de biens de valeur que les feuilles, mais sont également beaucoup moins sujets aux changements de saisons ou à d'importantes variations dans la teneur en humidité. Par conséquent, bien qu'ils ne reçoivent pas autant de chaleur que les feuilles, à cause de la présence atténuante de la vitre et de la moustiquaire de la fenêtre et à cause de la protection offerte par l'immeuble lui-même, (voir au chapitre 5) ils constituent en général un plus grand risque d'incendie.

6.7 Lorsqu'il est question de textiles inflammables, on pense tout naturellement aux tentures dans les fenêtres où la protection offerte par l'immeuble est moins efficace. Ces tentures semblent constituer un plus grand danger que le papier, particulièrement au cours d'une attaque nocturne lorsqu'on les a fermées. Dans ce cas, elles peuvent protéger efficacement d'autres matières inflammables dans l'immeuble, tout en absorbant une importante quantité de la chaleur dégagée. Toutefois, certains immeubles commerciaux ou industriels ne sont pas munis de tentures; dans de nombreux immeubles, les tentures sont tissées de fibres de verre incombustibles ou de textiles traités avec des ignifuges; d'autres immeubles sont munis de stores vénitiens en lattes métalliques incombustibles. De plus, de nombreux tissus modernes sont de couleurs claires et leur surface chatoyante tend à refléter la chaleur, à diminuer l'absorption de la chaleur.

6.8 D'autre part, on trouve du papier en plus ou moins grande quantité et sous toutes les formes dans tous les genres d'immeubles. Beaucoup contiennent des colorants d'imprimerie foncés qui absorberont sans doute la chaleur; une forte proportion de ces papiers ont une surface mate peu réfléchissante. Si l'on compare les qualités respectives des textiles et du papier, il semble que le papier soit la matière la plus inflammable.

6.9 Si l'on accepte que le papier foncé, mat, comme le papier journal, constitue la matière inflammable la plus répandue, on peut se fonder sur le fait que, près du point zéro, les dommages causés par l'énergie thermique sont très grands. On peut logiquement supposer qu'à mesure que la distance du point zéro augmente, le risque d'incendie primaire diminue jusqu'à ce qu'à une certaine distance limite, le papier seul s'enflamme. Au-delà de cette limite, les incendies primaires sont plutôt des cas isolés et on peut les circonscrire beaucoup plus facilement. Ainsi la distance limite marque la frontière d'une zone à l'intérieur de laquelle peuvent se produire des incendies primaires et où l'on peut prévoir des dommages sérieux si un incendie se propage.



## CHAPITRE 7

### INFLAMMATION DES MATIÈRES CELLULOSIQUES SOLIDES

7.1 Quand un combustible solide à base de cellulose est soumis à une irradiation thermique, des gaz chauds se dégagent de la surface chauffée. Si ces gaz sont émis avec une énergie chimique et physique suffisante, et s'il y a assez d'oxygène dans l'air pour qu'il y ait un mélange bien proportionné de combustible et d'air, il est probable que le mélange prenne feu. Si cela se produit, la flamme peut se propager le long des jets de gaz vers la substance mère et l'endommager ou la détruire. Ce phénomène, appelé inflammation est probablement la forme la plus familière de combustion. Cependant, si on peut classer l'inflammation selon ses effets sur la substance mère, elle peut se produire sous trois formes distinctes.

7.2 La première implique une combustion spontanée et soutenue des gaz qui produit un profond changement dans les propriétés chimiques et physiques de la substance mère. Ceci se produit habituellement quand on maintient une irradiation très intense suffisamment longtemps pour atteindre profondément le solide de telle sorte que, même si la source de chaleur est enlevée, la combustion continue. Cette forme d'inflammation est liée à de hautes températures de surface, et, d'une façon complexe, dépend de l'épaisseur du corps.

7.3 La seconde forme est souvent appelée inflammation passagère. Bien qu'elle ait plusieurs des caractéristiques de l'inflammation à combustion spontanée et soutenue, elle est beaucoup moins violente et, habituellement, la combustion cesse dès qu'on enlève la source de chaleur. Ce phénomène peut s'expliquer de plusieurs façons. L'irradiation à haute intensité peut ne pas avoir été maintenue assez longtemps pour qu'il y ait combustion soutenue. Ou il peut ne pas y avoir assez de gaz ou d'air pour produire un mélange combustible. Le mélange combustible peut encore se faire trop loin de la substance mère pour affecter celle-ci à un degré quelconque. On discutera une autre explication possible à l'alinéa 14 du présent chapitre. Quelle qu'en soit la raison, ce genre d'inflammation n'atteint pas habituellement le corps solide en profondeur, mais les dommages infligés sont plutôt limités en grande partie à la surface.

7.4 Le troisième genre d'inflammation entraîne une destruction ou carbonisation de la substance mère et libère de la chaleur et de la lumière. Ce genre de dommages est habituellement causé par des radiations relativement peu intenses qui sont maintenues très longtemps. Les gaz sont émis trop lentement ou avec trop peu d'énergie pour prendre feu au contact de l'oxygène contenu dans l'air. On peut obtenir un effet semblable en limitant l'arrivée de l'oxygène plutôt que celle des gaz. Ce dernier procédé est à la base de la production du charbon de bois.

7.5 Les trois genres précédents d'inflammation ne se produisent que lorsqu'on applique une chaleur radiante. La situation change quelque peu si on introduit une flamme ou une étincelle dans le jet de gaz. Cependant, si l'on suppose que, près de la limite de la zone primaire d'inflammation, la tête de choc arrive sensiblement après l'intensité thermique maximum, on peut raisonnablement en conclure que la combustion se produit sans avoir été provoquée par une flamme. Après une évaluation qualitative des trois phénomènes il semble évident que c'est dans l'inflammation à combustion spontanée et soutenue que réside le plus grand danger d'incendie. Il est donc important de pouvoir prédire le genre d'incendie que peut produire la chaleur dégagée par une arme nucléaire d'une puissance totale connue. Par exemple, dans la figure 3.9.1, on présente les impulsions thermiques de deux armes, l'une d'une puissance totale de 100 kilotonnes, l'autre de 10 mégatonnes, chacune produisant 30 calories par centimètre carré. Une



analyse des courbes révèle que l'intensité maximum de la dernière arme est de beaucoup inférieure à celle de la première. Comme les trois genres d'inflammation dépendent de l'intensité et du temps, il est possible qu'une impulsion cause une inflammation à combustion soutenue du papier alors que l'autre ne cause qu'une combustion passagère, ou les deux peuvent causer une combustion soutenue. Malheureusement, il n'y a pas de formule mathématique simple qui puisse servir à prédire le genre d'inflammation.

7.6 Les difficultés proviennent de la complexité des changements chimiques et physiques qui surviennent lors de l'échauffement. Bien qu'on puisse exprimer par une formule mathématique générale <sup>3</sup> la relation de tous les phénomènes fondamentaux menant à l'inflammation, il est impossible de résoudre cette formule sans émettre certaines hypothèses, ce qui fait surgir des doutes quant à la solution. Cette constatation a conduit à plusieurs tentatives en vue de découvrir une formule mathématique plus simple pour expliquer le processus de l'inflammation. Jusqu'à maintenant, aucune des formules proposées n'a reçu l'approbation générale. En général, on peut diviser ces formules en deux groupes. L'un souligne l'importance de l'énergie que dégagent les gaz; l'autre se fonde sur les concepts du transfert de la chaleur. Bien qu'il soit commode d'accepter l'une ou l'autre de ces formules, la plupart des chercheurs admettent qu'en pratique, les processus de l'énergie dégagée par les gaz et du transfert de la chaleur se complètent nécessairement.

7.7 Ces hypothèses qui proposent de mettre l'émission des gaz en corrélation avec l'inflammation sont habituellement fondées sur l'équation d'Arrhenius. Cette relation est exprimée sous une forme abrégée dans l'équation 7.7.1. Habituellement, on suppose que la valeur de E dans cette équation est constante, bien qu'il y ait des raisons de croire qu'elle peut, en fait, varier pour correspondre à un certain nombre de réactions chimiques complexes qui ont lieu au cours de l'irradiation.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} \propto e^{\frac{-E}{RT}} \quad - 7.9.1$$

où  $\omega$  = la concentration en gm. cm<sup>-3</sup> des gaz réactifs

$t$  = le temps en secondes

$E$  = l'énergie utile en calories mol<sup>-1</sup> nécessaire pour activer une molécule de réactif jusqu'au point où la réaction peut se produire.

$R$  = la constante universelle des gaz

$T$  = la température absolue en °K

Néanmoins, il y a eu un certain nombre de tentatives fructueuses pour expliquer, au moyen de l'équation fondamentalement simple d'Arrhenius, certaines inflammations produites en laboratoire, bien qu'on puisse se tromper en supposant que E est constant pour une matière cellulosique combustible. Banford, Crank et Malan<sup>4</sup> ont utilisé un critère, indiqué dans l'équation 7.7.2, qui sous-entend que, à un taux critique d'émission de gaz, il est probable qu'une combustion soutenue se produise. Après avoir fait des expériences, ils avancent que ce taux est de 2.5 x 10<sup>-4</sup> grammes par centimètre carré par seconde. D'autre part, Lawrence<sup>5</sup> a trouvé qu'au

moment de l'inflammation, le taux de dégagement de gaz était uniformément plus élevé que celui que proposent Bamford, Crank et Malan. Sauer et Williams<sup>6</sup> ont abordé le problème de façon légèrement différente en tentant de mettre les dommages causés par la chaleur en corrélation avec un contenu critique de gaz restant dans la substance mère. Toutefois, on a critiqué cette méthode

$$\int_0^{\ell} \frac{\partial \omega}{\partial t} dx \geq N \quad - 7.7.2$$

où  $N$  = le taux critique de dégagement de gaz en gm. cm<sup>-2</sup>. sec<sup>-1</sup>

$\ell$  = épaisseur du solide

et  $x$  = profondeur à partir de la surface du solide

Les autres symboles étant les mêmes que ceux de l'équation 7.7.1.

en admettant que la valeur de  $E$  pour une substance donnée n'est pas connue assez exactement.

7.8 Ceux qui proposent d'utiliser les méthodes de transfert de la chaleur pour fournir une formule mathématique, font remarquer que dans l'équation d'Arrhenius (voir équation 7.7.1) le taux de dégagement des gaz dépend de la température  $T$ . Ils avancent donc, avec quelque raison d'ailleurs, que, comme les méthodes de transfert de la chaleur fournissent une solution en ce qui concerne la température, le taux de dégagement est, de fait, compris dans leur formule. Pour plus de commodité, ils utilisent la température de la substance mère plutôt que celle des gaz. Comme les deux sont apparentées, une telle mesure paraît bien raisonnable. Cependant, il semble y avoir une grande divergence d'opinions quant à la valeur des températures qui correspondent à chaque genre d'inflammation. A vrai dire, il ne semble pas que cette façon d'aborder le problème puisse faire une distinction nette entre les trois formes fondamentales d'inflammation.

7.9 Un certain nombre de difficultés surgissent également qui occasionnent des inexactitudes dans les solutions mathématiques aux problèmes du transfert de la chaleur. La plupart de ces difficultés proviennent des pertes de chaleur. Heureusement, elles sont d'une nature qui n'entraîne pas toujours des erreurs graves. Il est bon, toutefois, de les discuter, au moins qualitativement, de telle sorte qu'on puisse apprécier quelque peu les difficultés auxquelles le mathématicien se heurte.

7.10 Quand la chaleur entre en contact avec un solide, une partie de cette chaleur est perdue par suite de la réflexion. Cependant, le taux de perte change à mesure que les couleurs de surface changent sous l'effet de l'irradiation. Dans le cas du papier mat contenant des colorants sombres, cette perte ne sera probablement pas importante. La chaleur que la substance accepte sert à augmenter sa température. Il en résulte que le corps lui-même devient un radiateur capable d'émettre ou de réémettre de la chaleur. De plus, la convection naturelle des courants d'air tend à refroidir le corps. Cet effet est plutôt difficile à prédire avec exactitude car il varie selon un certain nombre de phénomènes qui lui sont propres et parce qu'il prend un peu de temps à s'établir comme mécanisme significatif de refroidissement. Il n'est donc pas habituellement important dans une irradiation très courte telle que celle qu'on peut attendre des armes de faible puissance. Cependant, comme les pertes dues à la convection et à la réémission sont du même ordre de grandeur dans un système<sup>7</sup> thermique établi et comme on a posé comme

critère des inflammations primaires le papier mat contenant des colorants sombres (voir chapitre 6) de telle sorte que les pertes dues à la réflexion sont habituellement faibles, il est souvent possible de ne tenir aucun compte des pertes de chaleur. Bien que cette façon de faire puisse entraîner des erreurs dans la solution, cela simplifie beaucoup les calculs du mathématicien.

7.11 La chaleur non perdue est conduite à l'intérieur du solide où elle élève la température de la substance avec laquelle elle entre en contact. On peut exprimer ce phénomène par l'équation 7.11.1. Dans ce rapport, on suppose que  $K$ ,  $\rho$  et  $c$  demeurent sensiblement constants

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \times \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad - 7.11.1$$

où  $T$  = température absolue en  $^{\circ}\text{K}$

$t$  = temps d'irradiation en secondes

$x$  = profondeur sous la surface chauffée, en cm.

$K$  = conductibilité calorique de la substance, en cals. cm.  $\text{cm}^{-2}$ .  $\text{sec}^{-1}$ .  $^{\circ}\text{K}^{-1}$ .

$\rho$  = densité de la substance, en gm.  $\text{cm}^{-3}$

$c$  = capacité calorique spécifique, en cals.  $\text{gm}^{-1}$ .  $^{\circ}\text{K}^{-1}$

pendant toute l'irradiation. Bien qu'une telle supposition ne soit pas nécessairement vraie, elle ne semble pas entraîner d'erreur grave. De plus, cette équation ne vaut que lorsque la chaleur est appliquée uniformément et normalement à une face d'un solide et quand sa diffusion latérale est négligeable.

7.12 Pour un solide d'une épaisseur limitée, il faut établir les conditions qui existent au début de l'irradiation, autant à la face exposée à la chaleur qu'à la face opposée qui est froide. Les conditions initiales applicables à cette discussion sont données dans l'équation 7.12.1. La condition limite aux faces chauffées est exprimée dans l'équation 7.12.2.

$$\text{Pour } t = 0 \text{ et } 0 < x < l \quad T = T_0 \quad - 7.12.1$$

et pour  $t > 0$  et  $x = 0$

$$\text{donc } -K \frac{\partial T}{\partial x} = T_A \times T_B \times T_W \times \frac{2 \times 10^{14}}{WR^2} \times t^3 \times e^{\frac{-93.75 t}{\sqrt{W}}} \quad - 7.12.2$$

$$\text{aussi, pour } t > 0 \text{ et } x = l \text{ donc } \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad - 7.12.3$$

où  $T_o$  = température ambiante au début de l'irradiation, en °K  
 $l$  = épaisseur du solide, en cm.

et les autres symboles sont ceux qui sont définis précédemment.

ce qui suppose comme admis que la puissance développée est égale à celle d'une arme nucléaire (voir équation 5.12.2). L'équation 7.12.3 pose la condition limite pour la surface non exposée et froide du solide irradié. Vu qu'il est impossible de savoir quelle sera la condition à cette limite, les auteurs suggèrent qu'il est raisonnable de supposer qu'il n'y aura pas de chaleur.

7.13 En résolvant l'équation 7.11.1 dans les conditions initiales et limites précitées, il est possible de prédire n'importe quand les températures à toute profondeur du solide. Si l'on connaissait les températures correspondantes des trois genres d'inflammation on pourrait alors croire résolu le problème de prédire l'inflammation. Malheureusement, tel n'est pas le cas, puisqu'il semble y avoir divergence d'opinion entre les autorités en la matière au sujet de la valeur de ces températures et de la profondeur à laquelle elles devraient être prises. Certaines données expérimentales, obtenues dans certaines intensités de puissance thermique libérée, favorisent l'acceptation de la température prise à la surface chauffée, tandis que d'autres données démontrent que la température prise à la face non exposée et froide peut être un bon critère.

7.14 L'adoption de tout critère de température est fortement influencée par un effet qu'a remarqué Simms<sup>8</sup> au cours d'une expérience sur l'irradiation des solides à base de cellulose. Il a constaté que l'inflammation se produisait là où les gaz se mélangeaient à l'air d'une manière turbulente, et que, si cette turbulence ne se produisait pas à une petite distance de la surface chauffée, il arrivait souvent que l'inflammation ne s'ensuivait pas. La démonstration en a été faite en comparant les effets de deux sources différentes de chaleur radiante sur une cible cellulosique. L'une de ces sources était un radiateur à gaz, l'autre était une lampe à filament de tungstène dont les rayons étaient réfléchis par un miroir ellipsoïdal qui les concentrait sur les spécimens. On a constaté que le radiateur à gaz causait des courants d'air d'une vitesse voisine de 50 pieds par seconde. Ces courants d'air tendaient à changer le régime laminaire du dégagement des gaz en régime de turbulence plus près des cibles que ne le faisait la source à filament de tungstène qui ne produisait aucun courant d'air. Quelquefois, cette dernière source ne réussissait pas à produire l'inflammation, sauf lorsqu'il se produisait une turbulence naturelle. On a constaté que ce phénomène avait lieu même quand la température de la surface et des gaz dépassait sensiblement la température engendrée par l'inflammation causée par le radiateur à gaz.

7.15 Des travaux de Simms, on peut raisonnablement conclure que les tentatives faites pour mettre la température en corrélation avec l'inflammation peuvent avoir une portée restreinte. On peut aussi en déduire que les expériences sur l'émission thermique des armes nucléaires doivent être menées avec un équipement qui simulera assez bien les conditions dans lesquelles l'inflammation peut se produire. Par exemple, dans la plupart des édifices, on ne trouvera généralement pas de courants d'air d'une vitesse de 50 pieds par seconde sauf peut-être près des ventilateurs, des bouches et sorties d'air ou des fenêtres ouvertes. Il semblerait donc que, avant l'arrivée du souffle, des sources de chaleur semblables au matériel à réflexion de chaleur utilisé par Simms devraient produire des conditions plus proches de celles qui existent juste après l'explosion que les appareils qui produisent des courants d'air.

7.16 Il est évident, d'après la discussion précédente, que les méthodes mathématiques servant à prédire les inflammations sont pleines de difficultés. C'est pourquoi il faut se fier beaucoup aux données purement expérimentales. Heureusement un grand nombre de travaux ont été accomplis ces dernières années, surtout par les *Naval Radiological Defence Laboratories* des États-Unis. On a rassemblé des données relatives à l'inflammation en utilisant des sources de chaleur radiante comparables à la technique du miroir de Simms et en simulant, par des moyens mécaniques, la forme de l'impulsion thermique dégagée par une arme nucléaire. A partir de ces données, on a préparé des séries de courbes pour faire la corrélation entre l'inflammation soutenue et l'énergie libérée par les armes. On a reproduit deux de ces séries dans les figures 7.16.1 et 7.16.2. La première série est tirée d'un rapport publié par Martin et Broido<sup>9</sup>; la deuxième provient de Bracciaventi et DeBold<sup>10</sup>. Les deux séries donnent les valeurs de l'énergie thermique nécessaire pour provoquer la combustion soutenue de matières très inflammables, en fonction de l'énergie totale de l'arme. Si l'on compare soigneusement les courbes du papier journal ou de la planche de fibre ondulée, on peut voir qu'elles ne sont pas identiques. Cette différence n'est pas trop prononcée car on sait que la libération d'énergie thermique dépend du carré de la distance oblique entre le point de l'explosion et le combustible. Il découle de cela que le moindre changement dans la distance oblique produit des changements marqués dans la puissance thermique.

7.17 Il est intéressant de comparer ces courbes avec les constatations expérimentales correspondantes de Martin et Lai<sup>11</sup>. On présente les résultats de leurs observations dans la figure 7.17.1. Bien que les données de cette figure ne soient pas d'une utilisation aussi simple que celles des figures 7.16.1 et 7.16.2, elles indiquent d'une façon très frappante la relation de la puissance maximum ( $P_p$ ) et de l'énergie thermique libérée ( $Q$ ) ainsi que les genres d'inflammation. On peut constater que l'incandescence soutenue se produit à des puissances relativement basses et à de hautes énergies, alors que l'inflammation passagère se produit à de hautes puissances et à de basses énergies. Nous démontrerons plus loin que cette dernière condition a un effet marqué sur le comportement des matières très inflammables soumises à l'irradiation des armes de haute altitude (voir Appendice A). Nous ne ferons pas ici de comparaison quantitative entre les prévisions de Martin et Lai relativement à l'inflammation et les suppositions des figures 7.16.1 et 7.16.2. Cependant, nous attirons l'attention sur les abscisses des trois groupes de données. La figure 7.17.1, montre des termes comprenant la puissance thermique maximum; les autres n'indiquent que l'énergie de l'arme. A première vue, il ne semble pas y avoir de rapport immédiat, mais l'équation 5.12.3 indique que la puissance maximum n'est définie que par l'énergie de l'arme, des coefficients numériques et un terme géométrique. Ainsi, d'une certaine façon, les trois figures rattachent l'inflammation à l'énergie thermique et à la puissance. C'est là un point d'une grande importance parce qu'il montre que l'inflammation dépend non seulement de la quantité de chaleur libérée mais aussi de l'intensité avec laquelle cette chaleur est libérée.

7.18 La question qui se pose maintenant est celle de savoir quelle série de données utiliser. Comme il n'y a aucune raison de douter de la validité de l'une ou l'autre série, il est probablement plus facile de choisir les valeurs qui donnent les réponses les plus prudentes et qui requièrent le moins de travail. C'est pourquoi nous adopterons les données de la figure 7.16.1. Ce choix étant fait, il est maintenant possible d'atteindre l'important objectif d'évaluer la distance maximum du point zéro à laquelle les matières très inflammables peuvent prendre feu et provoquer de grands incendies dans les édifices.

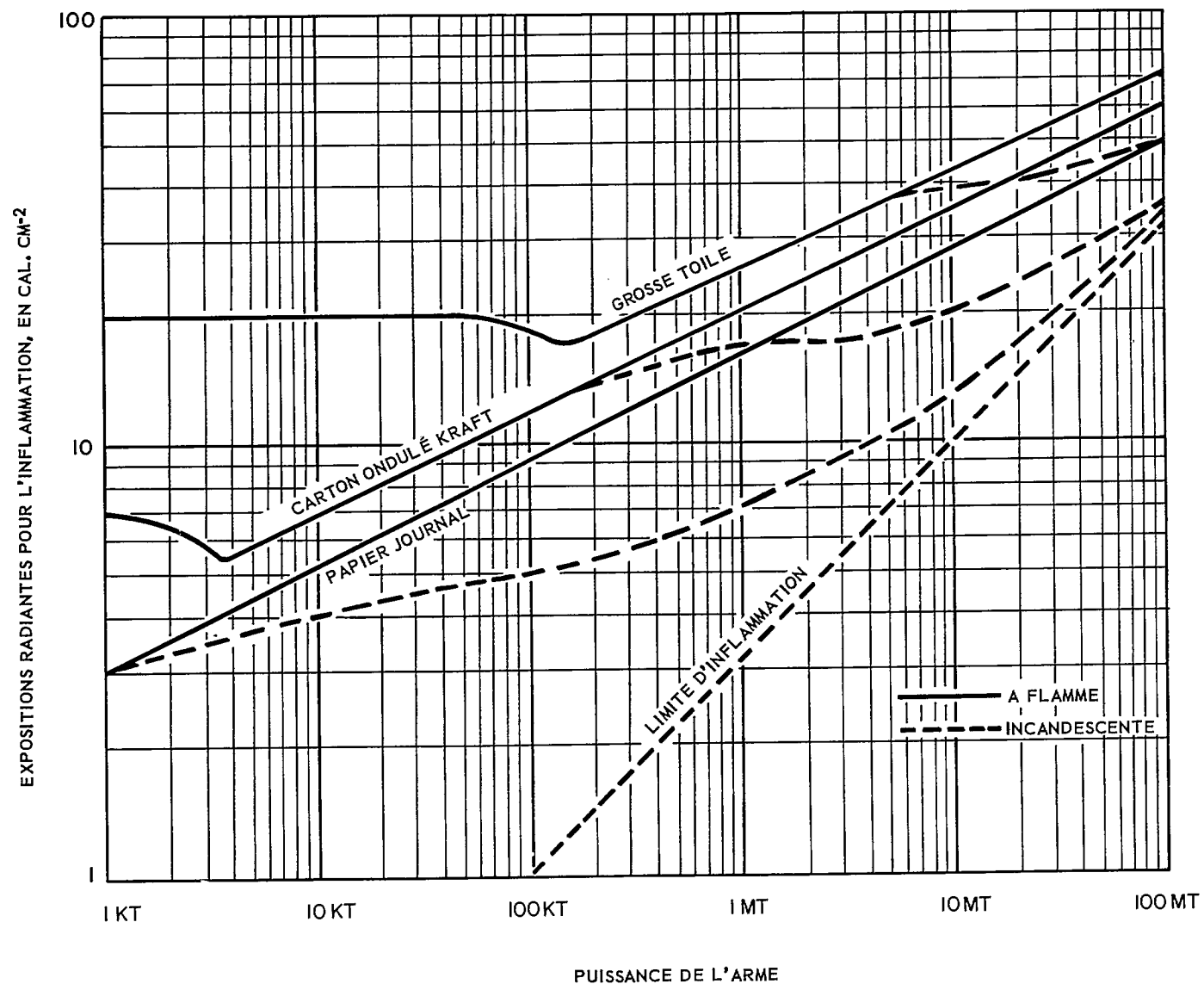


FIG. 7.16.1 EXPOSITIONS À L'IRRADIATION NÉCESSAIRES POUR PROVOQUER L'INFLAMMATION DE CERTAINS MATÉRIAUX (HUMIDITÉ RELATIVE DE 40 À 50%) EN FONCTION DE LA PUISSANCE TOTALE DE L'ARME. EXTRAIT DE "RAYONNEMENT THERMIQUE ET EFFETS INCENDIAIRES DES EXPLOSIONS NUCLÉAIRES" PAR S. MARTIN ET A. BROIDO<sup>9</sup>.

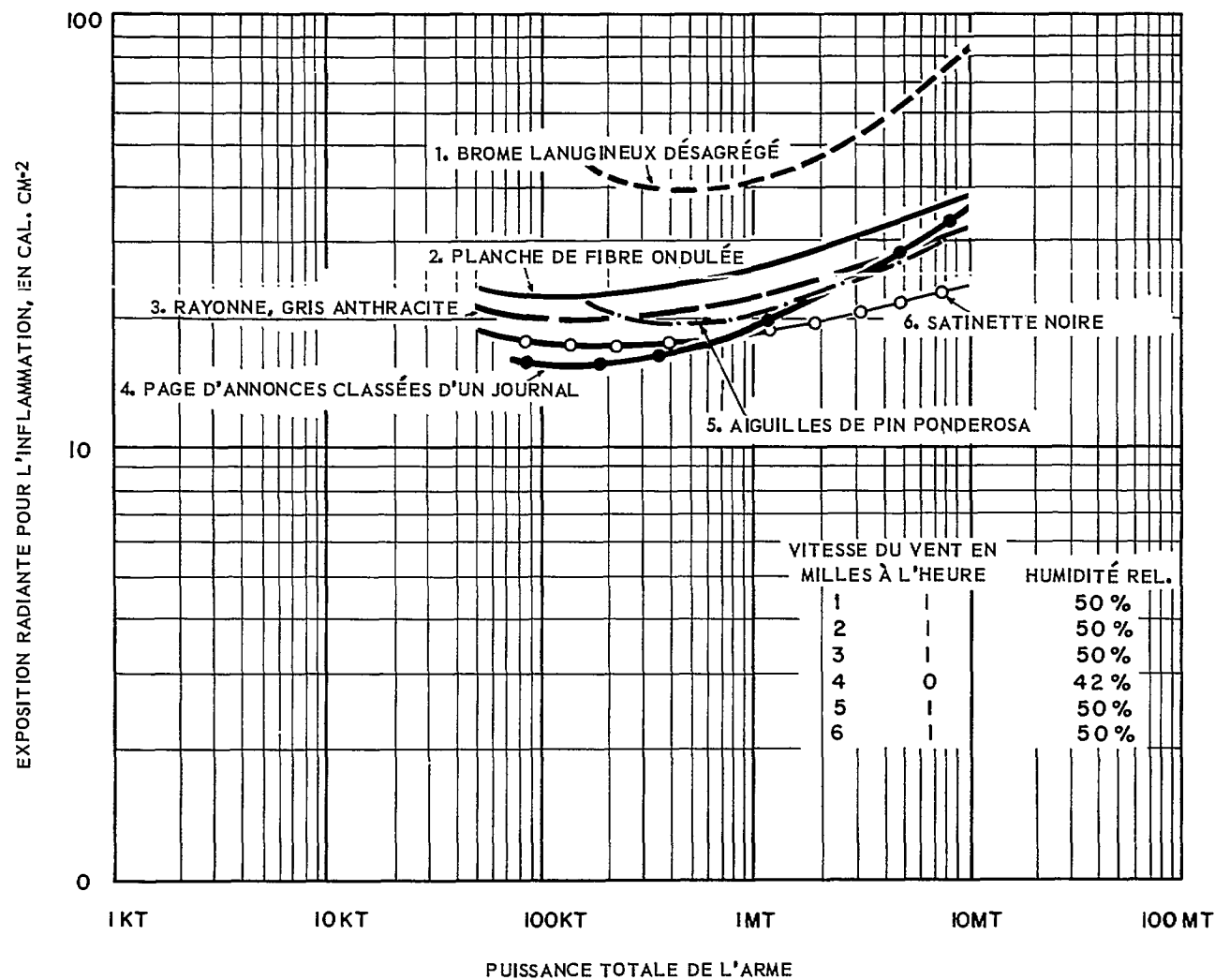


FIG. 7.16.2. EXPOSITIONS À L'IRRADIATION NÉCESSAIRES POUR PROVOQUER L'INFLAMMATION DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX EN FONCTION DE LA PUISSANCE TOTALE DE L'ARME. EXTRAIT DE "OBJECTIF TECHNIQUE AW-7" PAR J. BRACCAVENTI ET F. DEBOLD, JUILLET 1960.

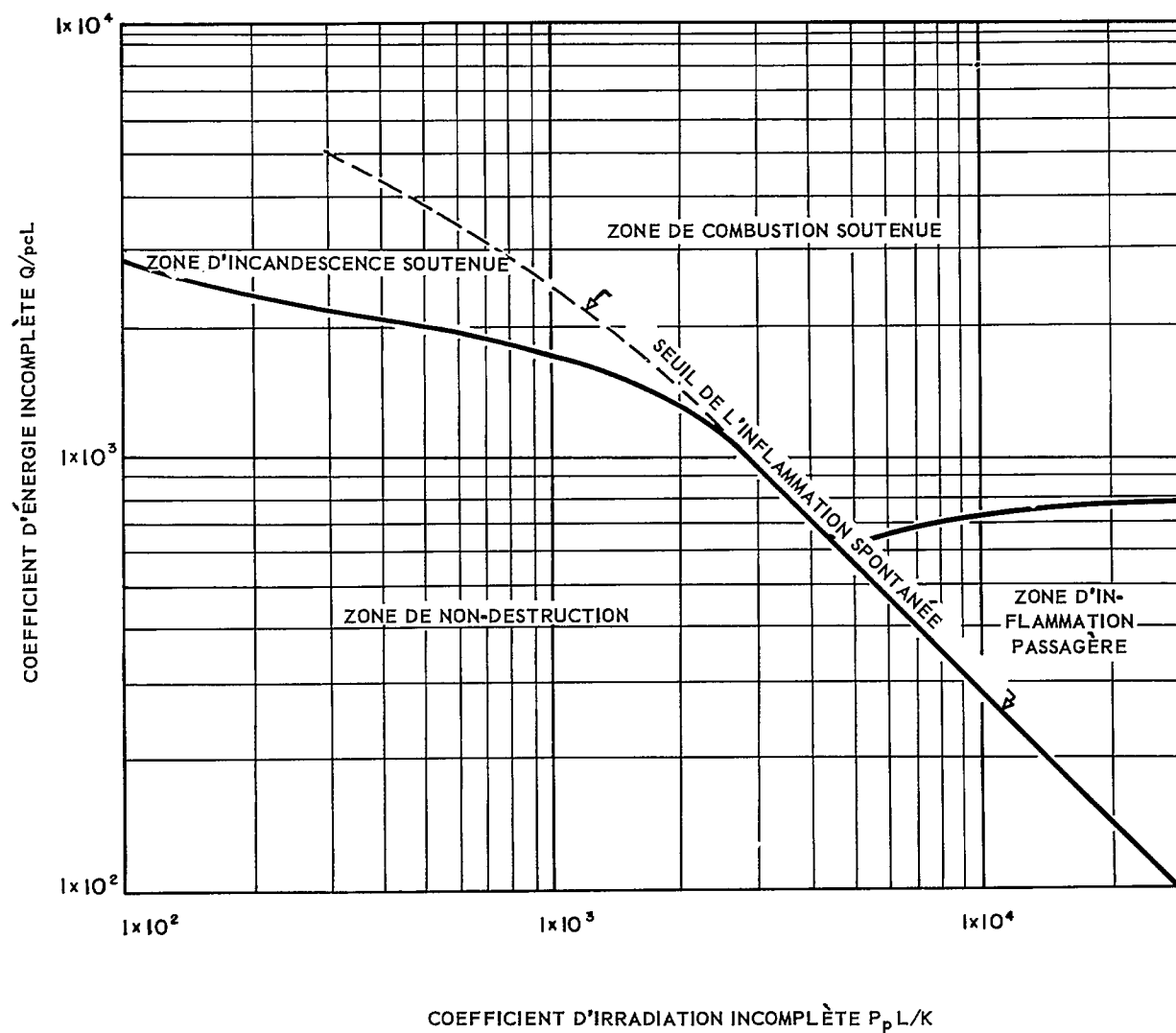


FIG. 7.17.1. GRAPHIQUE DU COMPORTEMENT DE L'INFLAMMATION DONNANT LES DIVERSES ZONES ET LE SEUIL D'INFLAMMATION SPONTANÉE. TIRÉ DE "DOMMAGES CAUSÉS PAR LA RADIATION THERMIQUE AUX SUBSTANCES CELLULOSES, PARTIE III - INFLAMMATION DE LA CELLULOSE ALPHA PAR DES IMPULSIONS SIMULANT DES EXPLOSIONS AÉRIENNES D'ARMES NUCLÉAIRES". PAR S.B. MARTIN ET W. LAI.



7.19 On se souviendra de la discussion du chapitre 6 où l'on a dit que le papier mat contenant des colorants sombres était probablement le combustible le plus susceptible de provoquer des incendies. On peut admettre que le papier journal, que l'on trouve partout, représente bien ce groupe. La figure 7.16.1 donne deux groupes de valeurs d'inflammation pour le papier journal, un pour l'inflammation soutenue (ligne continue), l'autre pour l'incandescence (ligne pointillée). Une troisième ligne donne les valeurs de l'énergie thermique minimum, pour un total donné d'énergie libérée, capable de provoquer l'inflammation. Il semble raisonnable de supposer que lorsqu'une inflammation soutenue se produit, le risque d'un vaste incendie est grand; d'autre part, à la limite minimum de l'inflammation, on peut supposer que le risque est minime. Par exemple, supposons qu'une arme d'une puissance totale de 10 mégatonnes explose. D'après la figure 7.16.1 on peut constater que l'inflammation soutenue du papier journal peut se produire là où l'énergie libérée est d'environ 28 calories par centimètre carré. S'il est possible de déterminer la distance du point zéro à laquelle l'énergie de cette valeur peut être reçue, on peut alors conclure qu'il y aura presque certainement de grands incendies entre cette distance limite et le point zéro. De même, la limite d'inflammation pour une arme d'une puissance totale de 10 mégatonnes se situe là où l'énergie libérée est d'environ 10 calories par centimètre carré. En utilisant cette valeur, il est peut-être possible de trouver une deuxième distance limite à partir du point zéro au delà de laquelle il est peu probable que des incendies se produisent. Entre ces deux limites, s'éloignant du point zéro, le risque de grands incendies causés directement par des inflammations primaires diminue rapidement. Ceci signifie que si on lutte contre l'incendie dès les premiers moments, cette lutte tend à devenir de plus en plus efficace à mesure que les incendies deviennent plus isolés et moins fréquents.

7.20 La méthode à suivre pour déterminer ces limites est très simple, mais elle est plutôt longue. Il faut utiliser la figure 7.16.1, l'équation 5.12.1, les tableaux 4.10.1 et 5.11.1 ainsi que les valeurs de  $\tau_B$  (voir chapitre 5). Si on n'a pas à sa disposition les résultats d'un levé photographique, on peut supposer que  $\tau_B$  est égal à une unité. On pourra mieux comprendre cette méthode par l'exemple suivant.

Exemple A des fins d'organisation, on a supposé qu'une arme d'une puissance totale de 5 mégatonnes peut exploser à une altitude de 5,000 pieds un jour où il n'y a pas de neige sur le sol et où la visibilité est de 10 milles. Il faut trouver la distance à laquelle le papier journal qui se trouve à l'intérieur de maisons pourvues de fenêtres à vitre double sans moustiquaire, peut subir une inflammation soutenue. Aucun levé photographique des édifices de la ville n'a été fait.

Solution

$$Q = \tau_A \times \tau_B \times \tau_W \times \frac{W \times 10^8}{4.51 R^2} \quad - 5.12.1$$

On inscrit les chiffres tirés de la figure 7.16.1 correspondant à 5 mégatonnes:

L'inflammation soutenue se produit quand  $Q = 23 \text{ calories. cm}^{-2}$

• • Donc le côté gauche de l'équation 5.12.1  $= 23 \text{ calories. cm}^{-2}$

$$\text{Le côté droit de l'équation 5.12.1} = \tau_A \times 1 \times \tau_W \times \frac{5,000 \times 10^8}{4.51 R^2}$$

$$\text{et } R^2 = 5,000^2 + (\text{distance du point zéro à la matière très inflammable})^2$$

en pieds

Essayons une distance de 20,000 pieds entre le point zéro et la matière très inflammable

On tire du tableau 4.10.1

$$\tau_A = 0.50$$

et

$$\begin{aligned} R^2 &= (5,000^2 + 20,000^2) \text{ pi}^2 \\ &= 425 \times 10^6 \text{ pi}^2 \end{aligned}$$

On tire du tableau 5.11.1

$$\tau_W = 0.31$$

Côté droit de

$$\left. \begin{array}{l} \text{l'équation 5.21.1} \end{array} \right\} \begin{aligned} &= 0.50 \times 1.0 \times 0.31 \times \frac{5,000 \times 10^8}{4.51 \times 425 \times 10^6} \\ &= 40 \text{ calories. cm}^{-2} \end{aligned}$$

Donc on a fait une évaluation insuffisante en prenant une distance de 20,000 pieds entre le point zéro et la matière très inflammable.

Essayons une distance de 25,000 pieds entre le point zéro et la matière très inflammable

On tire du tableau 4.10.1

$$\tau_A = 0.41 \text{ environ}$$

$$\tau_B = 1.0$$

$$\tau_W = 0.31$$

$$\begin{aligned} R^2 &= (5,000^2 + 25,000^2) \\ &= 650 \times 10^6 \text{ pi}^2 \end{aligned}$$

Côté droit de

$$\begin{aligned} \text{l'équation 5.12.1} \quad &= 0.41 \times 1.0 \times 0.31 \times \frac{5,000 \times 10^8}{4.51 \times 650 \times 10^6} \\ &= 21.6 \text{ calories. cm}^{-2}. \end{aligned}$$

Ainsi, l'évaluation de 25,000 pieds était exagérée mais pas tellement éloignée d'une distance qui donnerait l'énergie totale demandée de 23 calories. cm<sup>-2</sup>. On peut obtenir une réponse plus exacte en continuant d'appliquer la méthode de tâtonnement ci-dessus. Une autre façon d'obtenir une évaluation est de faire l'interpolation linéaire entre deux valeurs d'essai raisonnablement rapprochées. Quelle que soit la méthode employée, les hypothèses sur lesquelles on se fonde pour choisir l'énergie de l'arme, l'attitude de l'explosion et les conditions météorologiques ne

garantissent pas un écart inférieur à environ 500 pieds. Dans cet exemple, les auteurs accepteraient 24,500 pieds comme évaluation de la distance entre le point zéro et la matière très inflammable.

#### Réponse

7.21 Il est possible de calculer de la même manière la distance limite du point zéro à laquelle l'inflammation primaire (c'est-à-dire une inflammation causée directement par l'émission de chaleur radiante et non par la propagation de l'incendie) peut se produire. Si on suppose une arme d'une puissance totale de 5 mégatonnes, la figure 7.16.1 indique que l'énergie thermique minimum qui peut causer l'inflammation est d'environ 7 calories par centimètre carré. En utilisant la même méthode de tâtonnement que dans l'exemple, on peut calculer une distance qui correspond à cette énergie. Il est facile de voir qu'on peut tirer autour du point zéro deux cercles fermés si l'on dispose d'un ensemble donné de renseignements sur la puissance de l'arme, l'altitude de l'explosion, les conditions atmosphériques et des valeurs réelles de  $T_B$  et de  $T_W$ . Le cercle intérieur marque la limite de la zone où l'inflammation soutenue du papier journal est probable et où l'on peut s'attendre à de grands incendies. Le cercle extérieur marque la limite de la zone où les incendies sont possibles mais improbables et au-delà de laquelle il n'y aura probablement pas d'incendies primaires. La limite effective de la zone d'incendies primaires se trouve probablement entre ces deux cercles. La limite de la zone où de grands incendies sont probables tend probablement à se trouver plus près du cercle intérieur que du cercle extérieur. Il est impossible d'être plus précis. Cependant, aux fins d'organisation, il est souvent commode d'établir une seule zone pour évaluer les limites de la zone où des incendies primaires peuvent se produire. Faute de meilleurs renseignements, il est probablement raisonnable d'établir un cercle se trouvant à mi-chemin entre la limite de la zone d'inflammation probable et celle de la zone d'inflammation possible. Dans ce manuel, ce cercle sera appelé la limite de la zone effective d'incendies primaires. Malgré l'adoption de cette pratique, on doit toujours se souvenir que des incendies primaires peuvent se produire au-delà de cette limite mais qu'ils seront probablement isolés. On ne devrait donc considérer cette ligne de démarcation que comme une commodité.

7.22 On a calculé les distances du point zéro d'une arme d'une puissance totale de 5 mégatonnes aux limites intérieure et extérieure des incendies et on les a incorporées au tableau 7.22.1, selon différentes combinaisons de conditions atmosphériques, d'altitudes d'explosion, selon que le terrain est couvert ou non de neige et selon que les fenêtres sont munies de vitres ou non. On peut constater que si les autres facteurs ne varient pas, la distance à laquelle des incendies peuvent se produire dépend beaucoup des conditions atmosphériques. Par contraste, il est intéressant de noter que les attaques aériennes de la Seconde Guerre mondiale, faites avec des bombes incendiaires conventionnelles, sous la pluie, n'étaient que légèrement moins efficaces que les attaques faites par beau temps. Il y a lieu de croire que plusieurs problèmes se posent au stratège militaire dans l'évaluation des effets incendiaires des armes nucléaires parce que ces effets dépendent des conditions météorologiques. En effet, il peut n'être pas en mesure d'attendre des conditions atmosphériques qui permettraient de causer les plus grands dommages par l'incendie. Néanmoins, le tableau 7.22.1. montre qu'on peut causer des dommages considérables dans des conditions très variées.

			DISTANCE MAXIMUM DU POINT ZÉRO À LAQUELLE LE PAPIER JOURNAL PEUT SUBIR UNE INFLAMMATION SPONTANÉE, (EN PIEDS) PUISSANCE TOTALE DE L'ARME = 5 MÉGATONNES						
SURFACE DU TERRAIN	ALTITUDE DE L'EXPLOSION en pieds	VISIBILITÉ en milles	COMBINAISONS DE VITRES ET MOUSTIQUAIRES						INFLAMMATION PRIMAIRE
			RIEN	UNE SEULE MOUSTIQUAIRE	UNE SEULE VITRE	UNE SEULE VITRE ET UNE SEULE MOUSTIQUAIRE	VITRE DOUBLE	VITRE DOUBLE ET UNE SEULE MOUSTIQUAIRE	
Sans neige	5,000	2	21,000	17,000	16,500	14,500	14,000	12,000	Probable
			23,500	21,000	20,000	19,500	19,000	17,000	Possible
Sans neige	30,000	2	0	0	0	0	0	0	Probable
			28,000	21,000	18,000	8,000	2,000	0	Possible
Sans neige	5,000	10	36,000	31,000	30,000	25,500	24,500	21,500	Probable
			50,000	45,000	43,000	38,000	36,000	31,500	Possible
Sans neige	30,000	10	36,000	26,500	23,000	11,000	4,500	0	Probable
			64,000	53,000	50,000	40,000	36,500	27,000	Possible
Enneigée	5,000	10	39,000	35,000	33,500	30,000	28,000	25,000	Probable
			54,000	48,000	46,000	41,000	39,000	35,500	Possible
Enneigée	30,000	10	35,000	26,000	21,500	10,000	0	0	Probable
			64,000	53,500	49,000	40,000	36,000	26,500	Possible
Enneigée	5,000	50	61,000	53,000	50,000	42,000	40,000	34,000	Probable
			90,000	80,000	76,000	65,000	61,000	54,000	Possible
Enneigée	30,000	50	44,000	33,000	28,500	18,000	13,000	0	Probable
			82,000	68,000	62,000	49,000	45,000	34,000	Possible
Enneigée	0	2	16,500	15,000	14,500	13,000	12,500	11,000	Probable
			19,500	19,000	18,000	17,500	17,000	15,500	Possible
Enneigée	0	10	30,000	27,000	26,000	23,000	22,000	19,500	Probable
			41,000	37,500	36,000	32,000	30,000	27,500	Possible
Enneigée	0	50	48,000	41,000	39,000	33,000	30,000	26,000	Probable
			75,000	65,000	61,000	52,000	48,500	42,000	Possible

Figure 7.22.1 DISTANCE DU POINT ZÉRO D'UNE ARME NUCLÉAIRE AYANT UNE PUISSANCE TOTALE DE 5 MÉGATONNES, À LAQUELLE PEUT SE PRODUIRE L'INFLAMMATION SPONTANÉE SOUTENUE DE PAPIER JOURNAL SELON DIFFÉRENTES ALTITUDES D'EXPLOSION, UN TERRAIN COUVERT OU NON DE NEIGE, SELON LA VISIBILITÉ ET SELON QUE LES FENÊTRES SONT MUNIES OU NON DE VITRES ET DE MOUSTIQUAIRES.



## CHAPITRE 8

### EMBRASEMENT ET ESPACEMENT

8.1 Il n'est pas facile d'évaluer le risque d'un incendie important résultant de l'inflammation de papier à l'intérieur d'un bâtiment. Une grande variété dans la disposition et les propriétés des combustibles qui se trouvent dans des bâtiments du même genre empêche de formuler des règles élémentaires au sujet de la propagation des incendies. Toutefois, dans le cas d'une attaque nucléaire, on ne risque pas de se tromper en supposant qu'un nombre imposant d'édifices situés à ou près de la limite de la zone d'inflammation primaire probable définie par les méthodes du chapitre 7.21 subiront des dommages considérables causés par le feu.

8.2 On sait depuis longtemps qu'un incendie qui fait rage dans un bâtiment peut mettre le feu à des combustibles dans les immeubles avoisinants. Par conséquent, il est impossible d'évaluer les pertes causées par le feu en estimant le nombre d'édifices où des incendies primaires peuvent se produire. En effet, près de la limite de la zone d'inflammation primaire effective, les dommages causés par l'incendie (c'est-à-dire par la propagation du feu d'un immeuble à l'autre), seront vraisemblablement plus importants que ceux subis par les bâtiments où se sont produits des incendies primaires qu'on n'a pas essayé d'éteindre. La question importante qui se pose est de savoir si l'incendie se propagera vers l'extérieur et causera des dégâts dans les régions assez étendues qui peuvent se trouver au-delà de la zone d'inflammation primaire.

8.3 Les études faites concernant les incendies de bâtiments ont démontré qu'ils peuvent être causés de plusieurs façons que nous pouvons résumer ainsi: par l'écoulement de liquides enflammés d'un immeuble à l'autre, par le dégagement de la chaleur radiante d'un édifice en flammes; par le contact des flammes avec les gaz chauds; par des brandons. Les incendies dus à l'écoulement de liquides enflammés se limitent vraisemblablement aux régions industrielles et commerciales où les liquides inflammables, comme la peinture et l'alcool, sont entreposés en grande quantité. Dans les quartiers d'habitation, le risque ne semble pas important. Par rapport aux vastes étendues d'une ville-cible qui risquent de subir de nombreux incendies importants lors d'une attaque nucléaire, les quartiers qui subiront des dégâts causés par des liquides enflammés n'auront vraisemblablement qu'une importance locale et secondaire.

8.4 Par ailleurs, le risque d'incendie dû au dégagement de chaleur radiante d'un bâtiment en feu sera sans doute de la plus haute importance. On peut s'en rendre compte qualitativement si l'on se rappelle que la température d'un incendie qui fait rage dans des habitations peut atteindre et quelquefois même dépasser 1,000°C. Dans de telles conditions, les fenêtres et les autres ouvertures dans les murs extérieurs servent d'émetteurs de chaleur très efficaces (presque des corps noirs) analogues aux surfaces de petites boules de feu. Naturellement si la chaleur émise est d'une intensité suffisante et entre en contact avec les combustibles d'un immeuble voisin en quantité suffisante, il est probable qu'il en résultera une inflammation. On n'a pas nécessairement raison de supposer que seules les ouvertures de murs extérieurs font office de sources de chaleur planes puisqu'il est probable que la chaleur peut aussi être émise par les surfaces murales elles-mêmes. Par exemple, les panneaux de revêtement de matière inflammable qui recouvrent les murs peuvent contribuer pour une bonne part au dégagement de la chaleur. Néanmoins, on suppose ordinairement que seules les ouvertures pratiquées dans le mur font office de radiateurs.

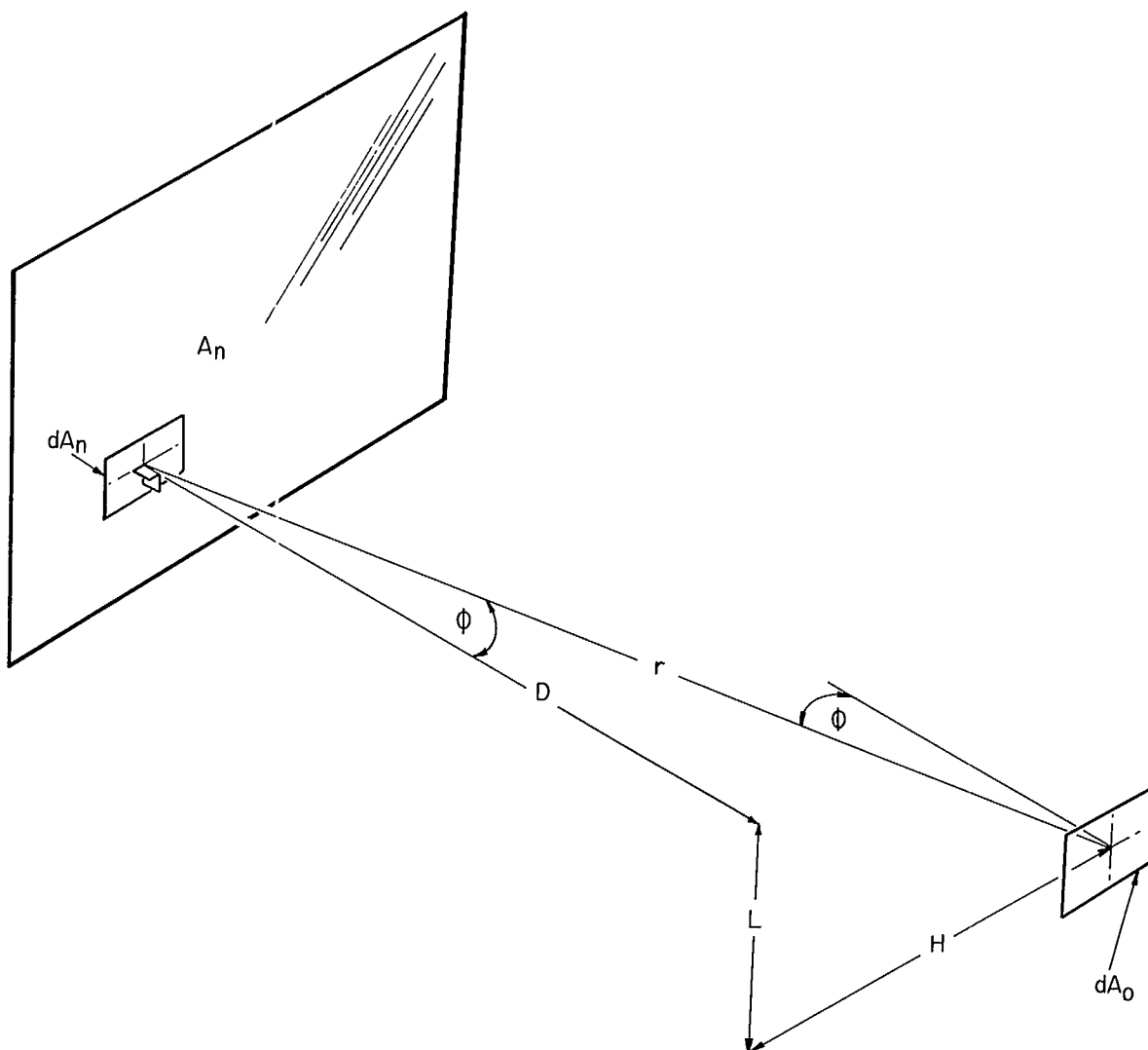


FIG. 8.5.1. RAPPORTS GÉOMÉTRIQUES ENTRE LES SURFACES RAYONNANTES ET LES SURFACES ABSORBANTES.

8.5 La chaleur projetée par un certain nombre de radiateurs disposés parallèlement sur un petit élément de la surface plane  $dA_o$  peut être calculée à partir du rapport exprimé dans l'équation 8.5.1. Le schéma de la figure 8.5.1. explique les notions géométriques dont on s'est servi.

$$P = \sum_1^N I_n \int_{A_n} \frac{\cos^2 \phi dA_n}{r^2} \quad - 8.5.1$$

- où
- $P$  = puissance thermique fournie au petit élément de surface plane de  $dA_o$ , en calories.  $\text{cm}^{-2}$ .  $\text{sec}^{-1}$
- $I_n$  = intensité de chaleur radiante émise d'un petit élément  $dA_n$ , de la source plane de la surface  $A$ , en calories.  $\text{cm}^{-2}$ .  $\text{sec}^{-1}$
- $\phi$  = angle entre la normale de la surface émettrice de l'élément  $dA_n$ , et une ligne qui joint l'élément au receveur  $dA_o$
- $r$  = distance entre les éléments  $dA_o$  et  $dA_n$  dans n'importe quelle unité de longueur (e.g. pieds, centimètres, etc.)
- $N$  = nombre de surfaces émettrices où 'n' appartient à la surface  $A_n$
- $A_n$  = surface de l'émetteur 'n' de la source plane de chaleur, en unités qui s'accordent avec les mesures de  $r$

On peut apporter un certain nombre de simplifications à l'équation 8.5.1 pour la rendre plus comode et plus pratique. Sans risque d'erreurs graves, il est possible, en général, de supposer une valeur 'moyenne' de  $r$  pour la surface  $A_n$  égale à la distance du centre de cette surface à l'élément récepteur  $dA_o$ . On peut maintenant remplacer l'équation 8.5.1 par l'équation 8.5.2.

$$\frac{P}{I_n} = \sum_I^N \frac{\cos^2 \phi A_n}{r_n^2} \quad - 8.5.2$$

- où
- $r_n$  = distance entre le centre de l'émetteur de la surface  $A_n$  et l'élément récepteur de la surface  $dA_o$

Aussi,  $I_n$  peut être supposé constant pour toutes les sources émettrices des ouvertures murales d'un immeuble en feu si la température à travers tout l'édifice est presque partout uniforme. Enfin, pour tout genre d'inflammation spécifié, le pouvoir thermique  $P$  possède une valeur fixe. Par exemple, une inflammation spontanée se produit dans plusieurs solides cellulosiques communs lorsque  $P = 0.8$  calorie par centimètre carré par seconde. Par conséquent, on peut prédire une inflammation en se basant simplement sur les termes géométriques de la partie à droite de l'équation 8.5.2. Ce membre de l'équation

$$\sum_I^N \frac{\cos^2 \phi A_n}{r_n^2}$$

est généralement connu sous le nom de facteur de structure et est parfois représenté par le symbole  $F$ .



8.6 MM. Bevan et Webster<sup>12</sup> ont fait des analyses au sujet des incendies de bâtiments afin de déterminer les valeurs des facteurs de structure qui auraient un certain rapport avec les dégâts causés par la chaleur. Le tableau 8.6.1 reproduit quelques-unes des conclusions auxquelles ils sont arrivés. On remarquera cependant que la carbonisation du bois commence lorsque le facteur de structure est environ 0.067, et que le bois commence à brûler lorsque le facteur est environ 0.093. Ces valeurs peuvent servir à prédire une probabilité d'incendie qui serait causé par la radiation. L'exemple suivant indiquera comment procéder.

F	CONDITION DE L'ENCADREMENT EN BOIS
0.067	Peinture cloquée
0.067	Peinture cloquée, peu de carbonisation
0.081=	Carbonisation de la surface
0.093	Brûlé
0.112	Brûlé

Tableau 8.6.1 DOMMAGES PAR RAPPORT AU FACTEUR DE STRUCTURE

## 8.7 Exemple d'incendie causé par la radiation provenant d'un immeuble en feu=

soit Les bâtiments A et B situés comme l'indique la figure 8.7.1.  
 Un incendie fait rage dans le bâtiment A.  
 La forme et la disposition des fenêtres ainsi que leurs dimensions sont données dans la figure 8.7.1.  
 Il faut trouver le facteur de structure au point 'X' de l'encadrement en bois d'une porte dans le bâtiment B.

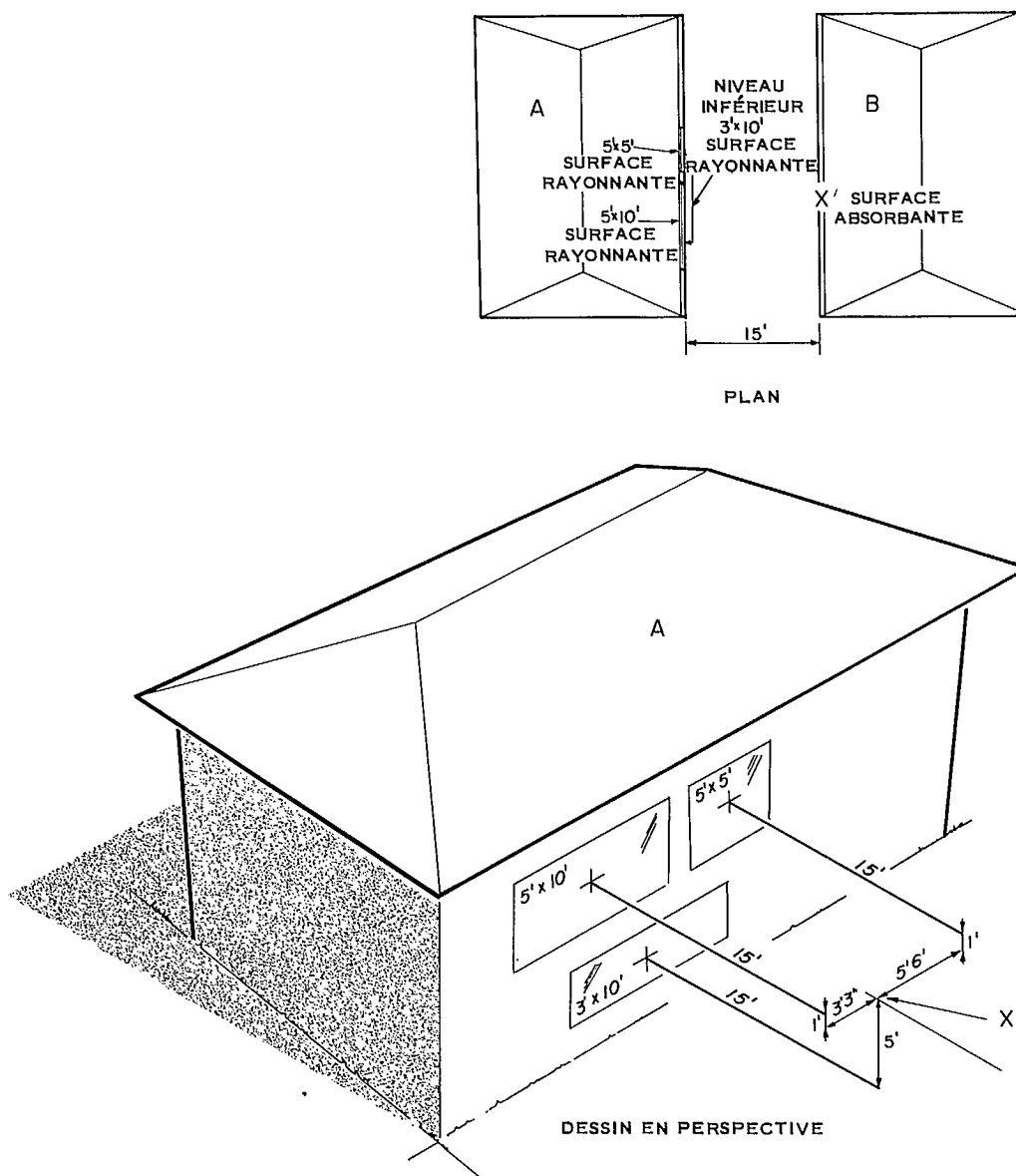


FIG. 8.7.1. ILLUSTRATION DU RAPPORT GÉOMÉTRIQUE ENTRE LES SURFACES RAYONNANTES ET LA SURFACE ABSORBANTE.

Solution

De l'équation 8.5.2.

$$F \text{ :: facteur de structure} = \sum_{n=1}^N \frac{\cos^2 \phi A_n}{r_n^2}$$

pour la fenêtre N° 1

$$A_1 = 5' \times 10' = 50 \text{ pi. carrés}$$

$$\cos^2 \phi = \frac{15.0^2}{(15.0^2 + 1.0^2 + 3.25^2)}$$

$$r^2 = (15.0^2 + 1.0^2 + 3.25^2)$$

$$\begin{aligned} \therefore F_1 &= \frac{50 \times 15.0^2}{(15.0^2 + 1.0^2 + 3.25^2)^2} \\ &= 0.200 \end{aligned}$$

De même

$$\begin{aligned} F_2 &= \frac{25.0 \times 15.0^2}{(15.0^2 + 1.0^2 + 5.5^2)^2} \\ &= 0.085 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{et } F_3 &= \frac{10.0' \times 3.0' \times 15.0^2}{(15.0^2 + 5.0^2)^2} \\ &= 0.108 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \sum_1^3 F &= 0.200 + 0.085 + 0.108 \\ &= 0.393 \end{aligned}$$

Du tableau 8.6.1., il est évident que l'encadrement de la porte au point X brûlera vraisemblablement.

Solution

8.12 Bien qu'il soit possible que, dans la plupart des cas, la chaleur radiante provenant des incendies de bâtiments cause plus d'incendies, les autres moyens de propagation d'incendie ne doivent pas être passés sous silence. Toutefois, puisqu'il n'y a pas de méthodes permettant d'évaluer leur importance relative, il est nécessaire d'établir un rapport empirique. Un tel rapport a été tiré d'une étude sur les dégâts causés par le feu dans les villes allemandes et japonaises qui subirent des raids aériens durant la Seconde Guerre mondiale. Ce rapport, qui est donné par l'équation 8.12.1<sup>13</sup>, et qui est illustré dans la figure 8.12.1,

$$p = 100e^{-0.013(X-3)} \quad - 8.12.1$$

où  $p$  = le pourcentage de possibilité qu'a un incendie de franchir un espace  $x$  largeur en pieds et de produire un embrasement.

$x$  = largeur de l'espace en pieds

essaie de donner une évaluation au sujet du feu qui franchirait un espace d'une largeur connue. Comme il ne peut pas y avoir une seule équation pouvant décrire toutes les dimensions et tous les genres d'immeubles de même que leur aménagement, l'équation 8.12.1 n'est rien d'autre qu'un guide utile. Toutefois, il semble que ce soit le meilleur élément d'information dont nous disposons, ayant l'avantage incontestable de l'expérience et de mesures prises sur place.

8.13 Il est souvent bon d'évaluer le nombre de bâtiments qui peuvent être détruits en grande partie par le feu dans les limites d'un pâté de maisons. Une étude menée dans les quartiers d'habitation du Japon à la suite d'une attaque par le feu a démontré que les dégâts étaient en proportion de la densité de bâtiments, c'est-à-dire de la partie de terrain recouverte de bâtiments. Cette étude confirme le rapport approximatif donné dans l'équation 8.13.1<sup>13</sup>. On peut trouver à partir de cette expression que lorsque la densité de bâtiments est de 59% (i.e.  $B = 0.59$ ), il en résulte une destruction complète. Malheureusement, les résultats équivalents

$$b_e = 1.88 B^{1.2} \quad - 8.13.1$$

où  $b_e$  = partie brûlée de bâtiment

et  $B$  = partie du terrain recouverte de bâtiments.

qui auraient eu un rapport plus direct avec les conditions au Canada n'ont pu être obtenus en Allemagne. Faute de mieux, on peut néanmoins se servir de l'équation 8.13.1 comme d'une approximation raisonnable.

8.8 On peut se demander comment calculer le facteur de structure lorsqu'une partie du mur extérieur s'effondre. Dans ce cas, la surface de l'ouverture fait fonction de fenêtre et il est possible de déterminer son effet de la même manière que dans l'exemple précédent au chapitre 8.7. Si l'effondrement implique une grande superficie du mur, il est souvent préférable de diviser la surface en sections plus petites et de considérer chacune comme une fenêtre. Lorsque le facteur de structure de chacune des parties a été calculé, on peut additionner les résultats pour obtenir le facteur de structure de l'aire totale.

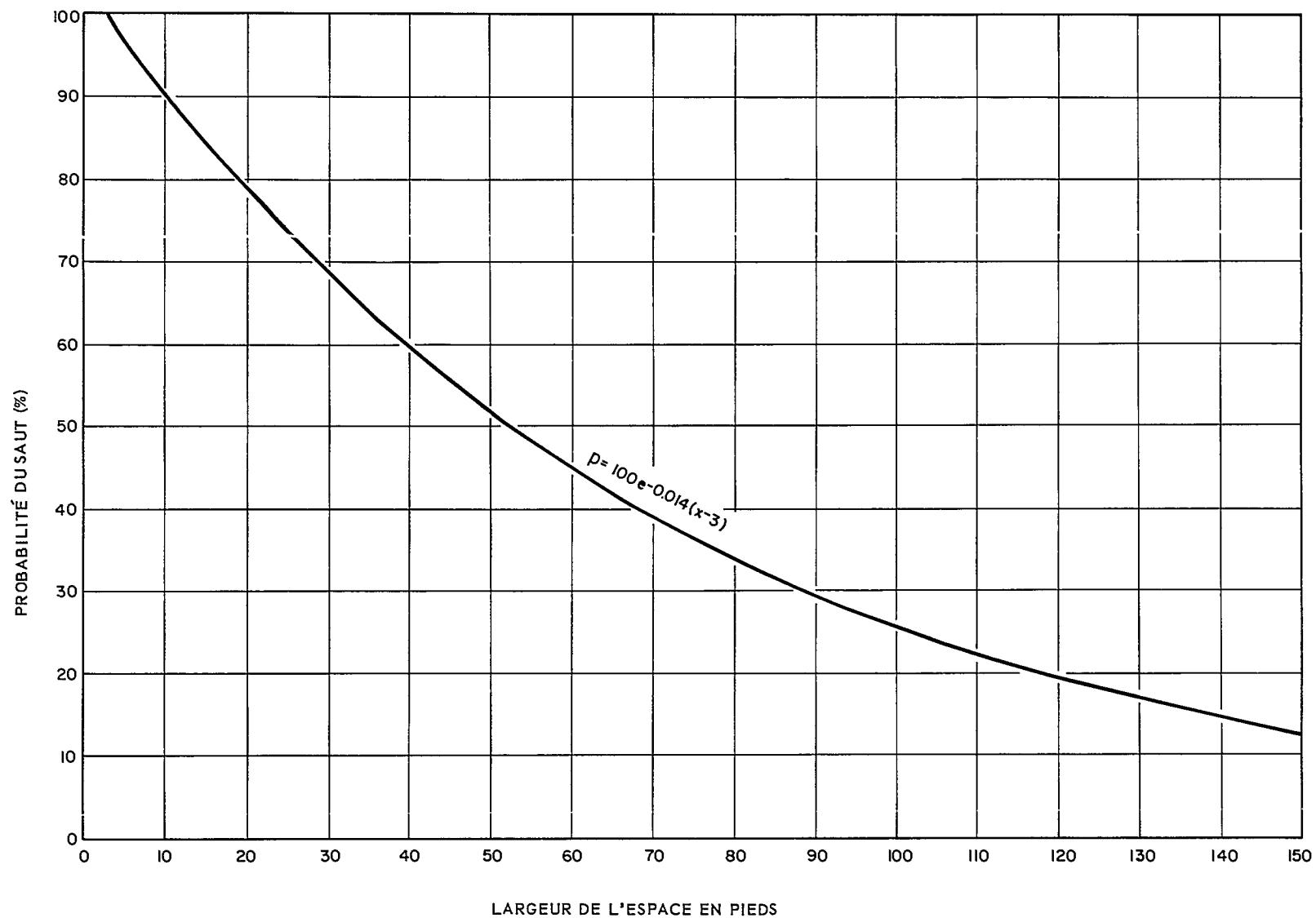


FIG. 8.12.1. ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ QUE LE FEU FRANCHIRA UN ESPACE (DÉRIVATION DE LA 2<sup>e</sup> GUERRE MONDIALE)  $p = e^{-0.014(x-3)}$   
 p = PROBABILITÉ, x = LARGEUR DE L'ESPACE EN PIEDS

8.9 Il est intéressant de noter de l'exemple donné au chapitre 8.7 que l'incendie peut très bien résulter de la chaleur radiante lorsqu'un espace d'une largeur de 15 pieds existe entre les bâtiments (qui, dans ce cas, représentent des habitations). Comme au Canada la distance qui sépare les maisons modernes dans les banlieues est souvent de cet ordre, le risque d'incendie est évidemment grand. Il y a lieu de croire que les lois actuelles déterminant l'espacement minimum qu'il doit y avoir entre les bâtiments sont basées sur l'hypothèse que les pompes à incendies et autre matériel utilisé dans la lutte contre l'incendie arriveront avant que le feu ne se propage. De toute évidence, le risque diminue à mesure que l'espacement s'accroît, mais pour des raisons d'économie de terrain et des services municipaux, il n'est pas toujours possible de fournir une marge de sécurité plus grande. Dans l'éventualité d'une attaque nucléaire, lorsque les pompes à incendie et autre matériel ne sont pas disponibles, on peut certainement supposer que la propagation de l'incendie d'un bâtiment à l'autre est en grande partie responsable des dégâts causés par le feu.

8.10 Malheureusement, les risques d'incendie ne dépendent pas seulement de la chaleur rayonnante. Il est aussi possible que les flammes ou les gaz chauds soient projetés assez loin de manière à entrer en contact avec les combustibles des bâtiments contigus. D'habitude cela se produit lorsque l'espace qui sépare les bâtiments est inférieur à 20 pieds, bien qu'il soit possible que le même effet se produise à une distance plus grande selon la direction du vent. Au point où en sont nos connaissances, il n'est pas possible de prédire l'effet des flammes et des gaz chauds. De même, il est impossible de prédire l'effet incendiaire des brandons.

8.11 Le vent exerce une influence sur tout ce qui est capable de propager l'incendie d'un bâtiment à l'autre, mais surtout sur les brandons. On a remarqué au cours d'incendies de bâtiments que les éléments qui jouent un rôle dans l'incendie comme la radiation, les flammes et les gaz chauds sont aussi sensibles aux changements de vitesse et de direction du vent. Cependant, on ne dispose pas de méthodes pouvant servir à prédire exactement leurs effets. Néanmoins, l'expérience a démontré que les incendies d'une étendue moyenne peuvent être maîtrisés grâce à une action prompte et déterminée, à condition que la vitesse du vent ne dépasse pas 15 milles à l'heure. Si la vitesse du vent s'élève à 30 milles à l'heure, le taux de propagation de l'incendie augmente considérablement. A cette vitesse plus élevée, un petit incendie limité à quelques bâtiments peut mettre en danger toutes les constructions situées dans le sens du vent.



## CHAPITRE 9

### INCENDIE GIGANTESQUES

9.1 Quelques-unes des nombreuses attaques aériennes de la Seconde Guerre mondiale sur les villes allemandes et japonaises ont causé des incendies gigantesques d'une violence destructrice peu commune. Dans ces cas, les effets démontrèrent qu'un nombre considérable d'incendies allumés dans des bâtiments distincts se fusionnaient en groupes imposants. En d'autres termes, des incendies isolés perdaient leurs caractéristiques individuelles en se combinant à d'autres incendies dans le voisinage et ne formaient plus ainsi qu'un immense incendie. Au fur et à mesure que le fusionnement progressait et que les groupes s'amplifiaient, les incendies brûlaient avec plus de force. Cette violence croissante est imputable aux conditions atmosphériques de la région, créées par des incendies gigantesques. D'habitude des vents s'élèvent qui soufflent en direction du feu, favorisant ainsi un plus grand fusionnement et intensifiant la combustion. Naturellement, il en résulte un renforcement du système atmosphérique imposé et le cycle se répète jusqu'à épuisement de toutes les réserves de combustibles. Toutefois, l'effet des conditions atmosphériques existant avant l'attaque peut fortement influencer la forme et le comportement de très vastes incendies. Quelques exemples illustreront mieux les cas.

9.2 En 1943, une attaque aérienne contre la ville de Hambourg, en Allemagne, a causé un incendie tellement gigantesque qu'environ la moitié des 500,000 maisons d'habitation de la ville furent détruites et que près de 60,000 habitants perdirent la vie. L'attaque principale, comportant un bombardement massif, fut menée rapidement, mettant hors d'usage tout moyen de défense disponible. On fit usage d'armes classiques: bombes incendiaires et bombes à grande puissance. Les bombes incendiaires furent employées en grand nombre. Environ une demi-heure après le lancement de l'attaque, deux bâtiments sur trois, sur une superficie de 4½ milles carrés, flambaient et des incendies prirent naissance sur une étendue d'environ 17 milles carrés. Une heure après, le fusionnement des incendies dans les régions plus petites allait bon train et l'incendie gigantesque qui s'ensuivit brûla avec une ardeur croissante pendant plusieurs heures jusqu'à ce qu'il n'y eut plus assez de matières combustibles pour alimenter le taux de propagation du sinistre.

9.3 Hambourg a subi ce qu'on appelle souvent aujourd'hui une "tempête de feu". On la définit ordinairement comme une masse de feu stationnaire, couvrant un vaste territoire où le fusionnement est soit avancé, soit complet, produisant une puissante attraction de vents locaux provenant de toutes les directions et soufflant du côté du feu. Ces vents circonscrivent la tempête de feu et l'empêchent de se propager mais lui fournissent aussi de l'oxygène ce qui accroît son intensité. Avant le bombardement il y avait eu une vague de chaleur prolongée dans la région. Les vents étaient légers et la température de surface a pu s'élever jusqu'à 100°F. dans certains districts qui devaient subir de grands dégâts durant les attaques. On croit que l'humidité relative était généralement faible. Ainsi, les combustibles solides, étant secs, étaient probablement susceptibles de s'enflammer facilement. Lorsqu'un vaste incendie eut pris naissance et que le fusionnement fut assez avancé, une colonne de gaz enflammés de plus de 2½ milles de hauteur et de 1½ mille de diamètre s'éleva de la région de la tempête de feu. De grands courants de convection d'air ascendant et descendant se formèrent et des vents horizontaux, qui soufflaient en ouragan au périmètre, prirent naissance. Ceux-ci provoquèrent des courants d'air qu'on appelle parfois "vent de feu", soufflant de tous côtés en direction du feu. A cause de l'étendue de la région en jeu, et de l'effet de la rotation de la terre les vents de feu se déplaçaient en spirale plutôt qu'en ligne droite vers le centre. La profondeur de pénétration dans la région au-delà du périmètre a été estimée à environ ½ mille. Non seulement ces vents apportaient-ils de l'oxygène



nécessaire à la combustion mais leur action ressemblait à celle de l'air provenant d'un soufflet de forge. On a estimé que la chaleur d'une région soumise à une tempête de feu pouvait être suffisamment intense pour élever la température des rues bordées de hauts bâtiments à 1,400°F.

9.4 Les tempêtes de feu créées lors de la Seconde Guerre mondiale avaient plusieurs points en commun. Elles étaient toutes remarquables pour leur puissance destructive et les lourdes pertes en vies humaines qui en résultaient. Se basant sur les faits, il paraît évident que les incendies aussi gigantesques ne peuvent prendre naissance qu'à la suite de la production préalable de plusieurs incendies dans un temps assez court sur un vaste territoire, où il y a une bonne réserve de combustibles solides. Il semble essentiel que le vent qui souffle avant l'attaque ne soit qu'un vent léger de façon à ne pas empêcher la naissance de la tempête de feu ni de lui faire prendre des proportions plus grandes ou de la faire dévier de son emplacement original.

9.5 En dépit de leur férocité, il n'est pas nécessairement vrai que les tempêtes de feu soient plus désastreuses que les incendies gigantesques qui sont poussés par les vents dominants. Des bombes incendiaires furent lancées sur Tokyo en mars 1945 alors qu'un vent d'environ 25 milles à l'heure soufflait sur la zone-cible. Bien que cela empêcha la création de la tempête de feu stationnaire caractéristique, le vent propagea l'incendie à travers la ville et détruisit presque complètement toutes les constructions sur une superficie de 15 milles carrés. Les pertes en vies humaines furent plus élevées que celles enregistrées à Hambourg. Les faits démontrent que le fusionnement des incendies était bien avancé et que les vents de feu, comparables mais pas aussi violents que ceux qu'on avait provoqués dans la région de la tempête de feu à Hambourg, se formèrent. Les attaques des deux villes avaient plusieurs points en commun. Elles furent lancées contre des objectifs fortement approvisionnés en combustibles solides; de plus, chacune de ces villes fut soumise à une attaque massive à l'aide de bombes incendiaires. La seule différence importante réside dans la façon dont soufflait le vent avant l'attaque.

9.6 Les feux de forêt créent parfois des conditions qui ressemblent à celles qui résultent d'incendies gigantesques dans les villes. Il est possible que le temps joue un rôle plus important dans les feux de forêt violents que dans les incendies immenses qui prirent naissance lors des attaques sur des objectifs de guerre. Par exemple, un expert en la matière<sup>15</sup> a suggéré que le comportement d'un incendie qui s'est produit dans l'Arizona en 1956 peut être rattaché à la présence de vents de haute altitude et d'une grande vitesse connus sous le nom de chasses d'air. Ces vents ont tendance à produire des perturbations atmosphériques qui amènent parfois de violents grains locaux. Dans ce cas, on a trouvé que l'air qui se trouvait immédiatement au-dessus de l'incendie faisait un mouvement de rotation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, en se dirigeant vers le bas, en spirale, l'axe horizontal, pour former une "cellule de Bénard". Le diamètre de ce système de convection était d'environ 5,000 pieds, et une rotation complète se faisait sur une distance horizontale d'environ 6,000 pieds. En plus de faire tomber des étincelles et des brandons sur les régions latérales et les territoires situés dans le sens du vent, ce genre de tourbillon semble avoir amené une diminution de l'humidité relative au sol, près du théâtre de l'incendie; l'humidité est passée de 20 p. 100 à 4 p. 100. Naturellement la sécheresse des combustibles de la forêt qui en resulta rendit ceux-ci très inflammables. Cet incendie désastreux semble avoir eu des caractéristiques qui le rapproche des incendies de Hambourg et de Tokyo. Comme dans le cas de Hambourg, des combustibles solides avaient été séchés par le vent avant l'incendie; de même qu'à Tokyo, le vent a propagé l'incendie. Dans ces trois cas, il y avait une bonne réserve de combustibles assez rapprochés les uns des autres.

9.7 Avec des groupes de flammes obtenues en employant des combustibles gazeux, et dont ils contrôlaient la poussée, Putnam et Speich<sup>16</sup> ont simulé de gigantesques incendies. Ils ont trouvé que lorsque l'espace entre les flammes diminuait, elles tendaient de plus en plus à agir les unes sur les autres. Les pointes de feu s'inclinaient les unes vers les autres et les

flammes s'allongeaient et se rapprochaient de plus en plus jusqu'au moment où se produisait un fusionnement complet. (L'allongement était attribué à un écran commun qui bloquait en partie l'arrivée d'air induit aux chasses d'air. Afin de fournir une surface enflammée équivalant à celle à laquelle l'air a accès, on suppose qu'il est nécessaire que les chasses s'étendent et remplacent la surface perdue par l'écran. De plus, il semble y avoir un phénomène selon lequel les flammes s'attirent et se supportent mutuellement.) Pour n'importe quelle disposition de sources multiples, le taux d'écoulement du combustible, le nombre de chasse d'air et la disposition elle-même, tout semblait avoir un effet marqué sur le fusionnement des flammes. Cependant, pour une disposition donnée et dans des conditions déterminées d'espacement et de taux d'écoulement du combustible, il ne semble pas que la façon dont les sources sont disposées soit importante. Que les flammes soient réparties uniformément ou qu'elles soient réparties autour du périmètre de la surface, le degré de fusionnement reste constant. Putnam et Speich ont également fait des recherches sur les déplacements d'air en rapport avec les groupes de flammes. Ils ont trouvé qu'une disposition en ligne droite ou rectiligne (c'est-à-dire à peu près comparable aux conditions qui existaient à Tokyo, où l'on a décrit l'incendie comme "un mur de feu" par opposition au "territoire de feu" de Hambourg) amenait l'air de chaque côté de la ligne, alors qu'un groupement en surface ne recevait que de l'air se dirigeant vers le périmètre. On fit d'autres expériences avec les courants d'air appliqués aux groupes de flammes. Elles avaient pour but de simuler les effets des vents dominants sur les incendies gigantesques. Les flammes s'inclinaient selon le passage de l'air, comme prévu. Dans les dispositions rectilignes, la longueur des flammes diminuait sous la vitesse croissante des vents jusqu'à ce qu'une longueur constante d'environ 0.7 de la longueur non soufflée soit obtenue. Ainsi, même si l'inclinaison de la flamme dans un immense incendie qui se propage sous l'influence d'un vent peut accroître le risque d'inflammation des combustibles se trouvant sur son passage, il est possible que le raccourcissement de la flamme diminue le risque dans une certaine mesure.

9.8 Il est évident qu'une arme nucléaire est virtuellement capable de produire des incendies gigantesques dans une ville-cible. Hiroshima, le théâtre de la première attaque nucléaire, a connu une tempête de feu. A Nagasaki, théâtre de la seconde attaque, il y a eu commencement de plusieurs incendies gigantesques mais ce n'était pas comparable à ce qui s'est passé à Hiroshima, Hambourg ou Tokyo. Dans ce cas, la disposition du terrain empêchait la production d'incendies sur une assez grande partie de la cible, ce qui aurait permis à de vastes incendies massifs de prendre naissance.

9.9 La probabilité d'une tempête de feu a été rattachée à la densité des bâtiments et à l'étendue qu'ils recouvrent (c'est-à-dire le rapport, exprimé en pourcentage, entre la superficie des toits et la superficie totale de terrain à l'intérieur d'une zone choisie, et la partie de terrain occupée par chaque groupe de densité). On a proposé trois grandes catégories. La première comprend des bâtiments dont la densité se situe entre 0 et 5 p. 100. Dans cette catégorie, on ne s'attend pas que le feu s'étende au-delà du bâtiment où il a pris naissance. De plus, si la superficie de terrain couverte dans ce groupe est grande, elle peut fournir un coupe-feu suffisant. La seconde catégorie comprend les bâtiments dont la densité varie de 6 à 20 p. 100. Les zones comprises dans ce groupe peuvent subir les effets des incendies jusqu'à un certain point, mais il est improbable que des incendies gigantesques s'y produisent. La dernière catégorie comprend les régions où la densité des bâtiments dépasse 20 p. 100 et où l'étendue du terrain correspondant dépasse 1 mille carré. Dans ce cas, on peut s'attendre à des tempêtes de feu si les conditions atmosphériques le permettent.



## CHAPITRE 10

### LES EFFETS DES INCENDIE SUR LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

10.1 Après une attaque nucléaire, il est vraisemblable que les normes d'habitation ordinairement en vigueur ne seront plus appliquées durant un certain temps. Comme il est improbable que toutes les constructions d'une ville attaquée soient endommagées au même degré, celles qui auront subi le moins de dégâts devront nécessairement servir à abriter les gens qui sont temporairement sans foyer. Ce fait soulève la question de savoir quels sont les bâtiments dont la structure sera le moins endommagée par les incendies. La réponse se trouve partiellement dans la résistance possible des matériaux de construction aux températures élevées qu'on constate souvent lors des incendies qui ravagent les bâtiments. Il est très difficile de cataloguer les constructions selon leur résistance au feu car les modes de construction varient beaucoup et la quantité des matériaux employés varie tout autant. En fait il est probablement juste d'affirmer qu'avant de pouvoir évaluer avec certitude la résistance des bâtiments à l'incendie il faudrait étudier leur construction, ce qu'ils renferment et leur agencement. Évidemment ce serait là une tâche énorme et à laquelle les experts en la matière seraient obligés de consacrer une grande partie de leur temps. Pour cette raison, le reste du présent chapitre contient de brefs comptes rendus de la façon dont certains matériaux de construction d'usage courant réagissent à l'action du feu. Les matériaux dont il est question ne sont pas classés selon un ordre particulier.

10.2 Acier de construction (charpentes métalliques) — l'acier de construction est incombustible mais il n'est pas ignifuge. A de hautes températures, il peut se déformer et sa résistance et son élasticité peuvent subir des transformations. La figure 10.2.1<sup>17</sup> fait voir les variations qui se produisent dans les valeurs de la résistance limite à la tension et à la compression, à mesure que la température s'élève. On peut voir qu'aux stades initiaux, la résistance s'accroît; mais aux températures enregistrées durant un violent incendie, (disons, environ 1,800°F) on remarque une perte de résistance notable. Cette diminution de la force de soutènement peut entraîner une déformation marquée ou l'effondrement d'un bâtiment. Indépendamment de ces modifications de la résistance de l'acier, il se produit aussi une diminution du module d'élasticité (module d'élasticité de Young) quand la température s'élève. Le rapport approximatif entre le module et une température variant entre 200°F et 1,300°F, est indiqué dans l'équation 10.2.1<sup>18</sup>. Comme la résistance au flambage de piliers et d'entretoises longs et dont la charge est centrique, est directement proportionnelle au module d'élasticité, on peut conclure que lorsqu'ils sont soumis aux hautes températures observées au cours d'incendies de bâtiments, les piliers peuvent s'affaisser et entraîner l'écroulement des planchers et des toits qu'ils supportent. Ainsi

10.2.1

$$E = 32,400,000 - 17,000 T$$

quand E = module initial d'élasticité en livres par pouce carré

et T = température en degrés F.

si l'on présume que le module de l'acier est de 32,400,000 livres par pouce carré à la température normale d'intérieur, il ressort de l'équation 10.2.1 qu'il est seulement d'environ 10,300,000 livres par pouce carré à une température de 1,300°F. Cela représente une diminution du module d'environ 3.1 et, conséquemment, de la résistance au flambage. Une telle diminution peut souvent occasionner de fortes déformations ou l'écroulement des pièces qui soutiennent de lourdes charges et qui sont soumises à l'action du feu. Naturellement, ces réactions sont connues depuis longtemps et, dans nombre de cas, l'acier de construction est protégé d'une façon quelconque afin de retarder ou d'empêcher un affaissement catastrophique.

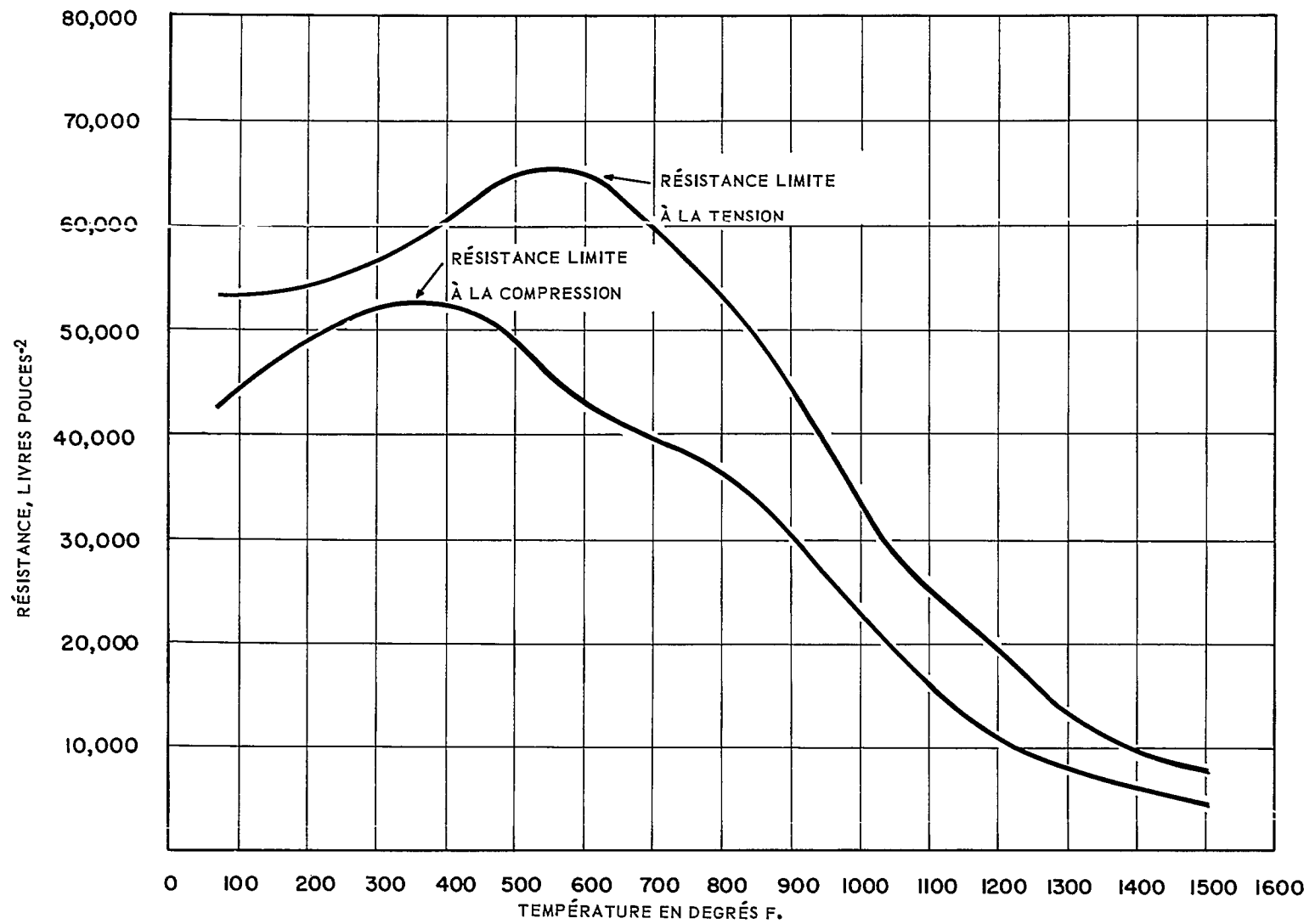


FIGURE 10.2.1 RÉSISTANCE DE L'ACIER DE CONSTRUCTION À L'EXPOSITION AU FEU.

10.3 Alliages d'aluminium — Les alliages d'aluminium employés dans la construction ont tendance à fondre et leur résistance diminue à des températures assez basses. En somme, ils ne résistent pas bien au feu. Les courbes de la résistance limite à la tension, de certains alliages sélectionnés, par comparaison à la chaleur, sont données à la figure 10.3.1<sup>17</sup>. On peut noter que les alliages d'aluminium en feuilles semblent mieux résister que les alliages de construction.

10.4 Fonte — Les pièces de construction en fonte, particulièrement les piliers, ont été largement employés dans les anciennes constructions et, en général, ont prouvé être plus résistants à la chaleur que l'acier de construction. Cependant, la fonte est sujette à craqueler et à rompre quand elle est brusquement refroidie, par exemple, quand les tuyaux d'incendie l'arrosent d'eau froide. Cette tendance a été la cause de certaines faiblesses dangereuses des constructions. L'emploi de la fonte est maintenant très limité dans la construction.

10.5 Briquetage — Le point de fusion des briques d'argile semble se situer entre 2,100°F et 2,500°F. Des incendies d'une violence inusitée ont entraîné leur fusion superficielle mais, dans la plupart des cas, le briquetage résiste très bien aux incendies. Néanmoins, la dilatation des pièces de charpente qui sont soumises à de hautes températures, repousse parfois les murs externes vers l'extérieur et les fait crouler. La possibilité de cet effroulement dépend de la rigidité du mur.

10.6 Béton armé — La résistance à la flexion du béton, composé de Portland ordinaire ou de ciments à haute teneur d'alumine, diminue à des températures élevées. La résistance à la compression du béton composé d'agréats de gravier, de grès ou de laitier déployé, peut sembler supérieure à celle qu'on note à la température normale d'intérieur, quand il est soumis à une température un peu plus élevée. Toutefois, dans les conditions qui existent ordinairement au cours d'un violent incendie, la résistance du béton diminue sensiblement. Le résultat des tests poursuivis par Zoldners<sup>19</sup> sur les bétons de ciment Portland composés d'agréats variés est reproduit dans les figures 10.6.1 et 10.6.2. A première vue, les données de ces figures ne semblent pas compatibles avec les excellentes propriétés de résistance au feu ordinairement attribuées au béton. La raison en est que les essais de Zoldners ont été faits sur de petits échantillons qui ont été chauffés durant une longue période de temps, de sorte que tout le béton a été soumis à une température élevée. Habituellement, les pièces de construction en béton sont massives par comparaison aux dimensions des pièces du test de Zoldners. Or, il arrive que dans nombre d'incendies violents, la partie centrale des pièces massives reste tiède et par conséquent résistante, même lorsque leur surface est abîmée. Cette inégalité de température entraîne parfois l'effritement des surfaces d'une pièce de béton soit par un manque de résistance à la chaleur, soit par un défaut des agréats et de la pâte de ciment. Si cet effritement se produit, une nouvelle surface sous-jacente est exposée au feu et la pénétration de la chaleur dans la pièce peut être intensifiée. Habituellement, une conséquence plus grave résulte de cet effritement; en effet, l'armature d'acier peut être exposée à la chaleur et perdre une partie de sa résistance à la tension (voir alinéa 10.2) ce qui peut entraîner l'effroulement de la construction. La documentation<sup>20</sup> comprend un exemple intéressant d'un test de résistance au feu, auquel on a soumis une dalle de béton solide de 5 pouces d'épaisseur dans des conditions contrôlées<sup>20</sup>. La température du soffite exposé a atteint 1,900°F. Après deux heures d'exposition au feu à des distances de 1 pouce et de 2½ pouces du soffite la température atteignait seulement 1,060°F et 670°F respectivement. Cet exemple démontre de manière frappante la résistance de la masse dans les structures de béton. Par contraste, l'acier de construction qui n'est pas protégé est généralement composé d'une âme et d'ailes minces à travers lesquelles la chaleur peut être répandue de façon assez uniforme. Comme la conductibilité de l'acier est bien supérieure à celle des bétons les plus courants, la chaleur est transmise beaucoup plus rapidement par l'acier que par le béton. Conséquemment, l'effroulement qui en résulte se produit plus tôt dans les armatures d'acier non protégées que dans les structures de béton, dans les mêmes conditions.

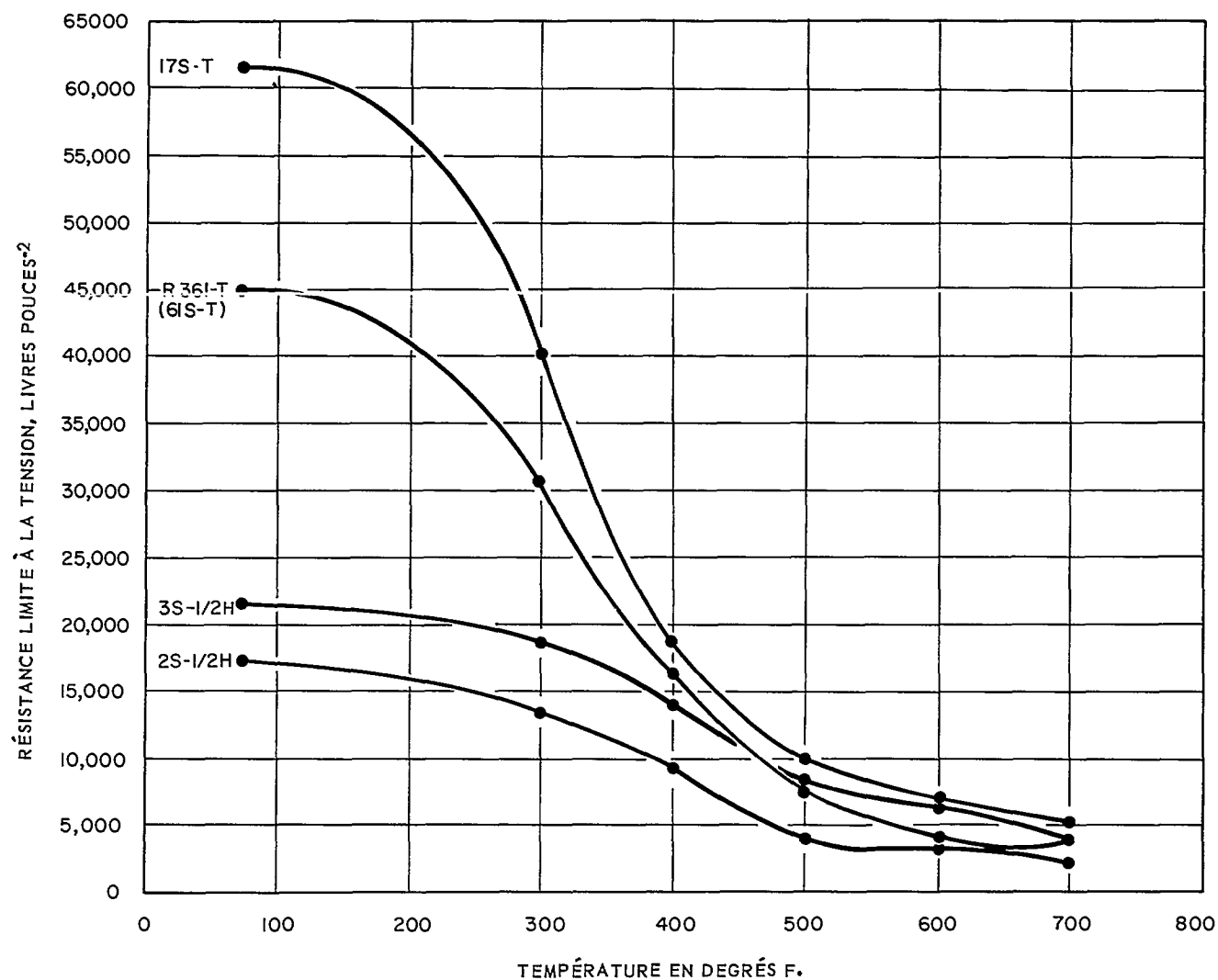


FIG. 10.3.1 LES EFFETS DE LA TEMPÉRATURE SUR LA RÉSISTANCE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM CORROYÉS. 17S-T ET 61S SONT DES ALLIAGES DE CONSTRUCTION TYPQUES; 3S-1/2H ET 2S-1/2 SONT DES ALLIAGES D'ALUMINIUM EN FEUILLES TYPQUES. LA COURBE FAIT VOIR LES RÉSULTATS DES TESTS APRÈS UNE CHAUFFE PROLONGÉE. LES COURBES ENTRE LES POINTS SONT PROBABLES.

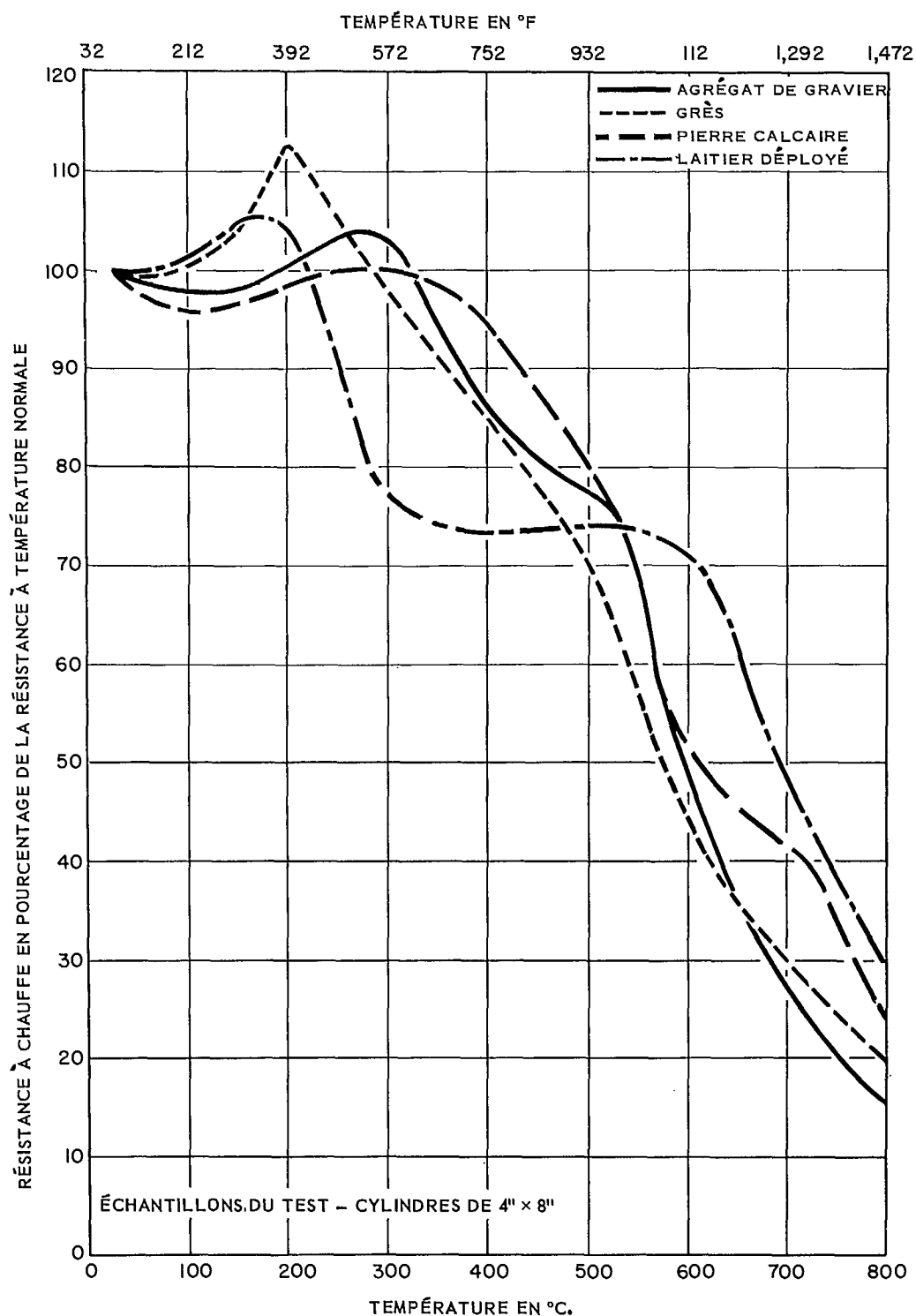


FIG. 10.6.1 PERTE DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DU BÉTON EN CIMENT PORTLAND SOUMIS À LA CHALEUR ET ESSAYÉ À LA TEMPÉRATURE DE LA PIÈCE. (ADAPTÉ DE "EFFET DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES SUR LE BÉTON COMPOSÉ DE DIFFÉRENTS AGRÉGATS" PAR N.G. ZOLDNERS.)



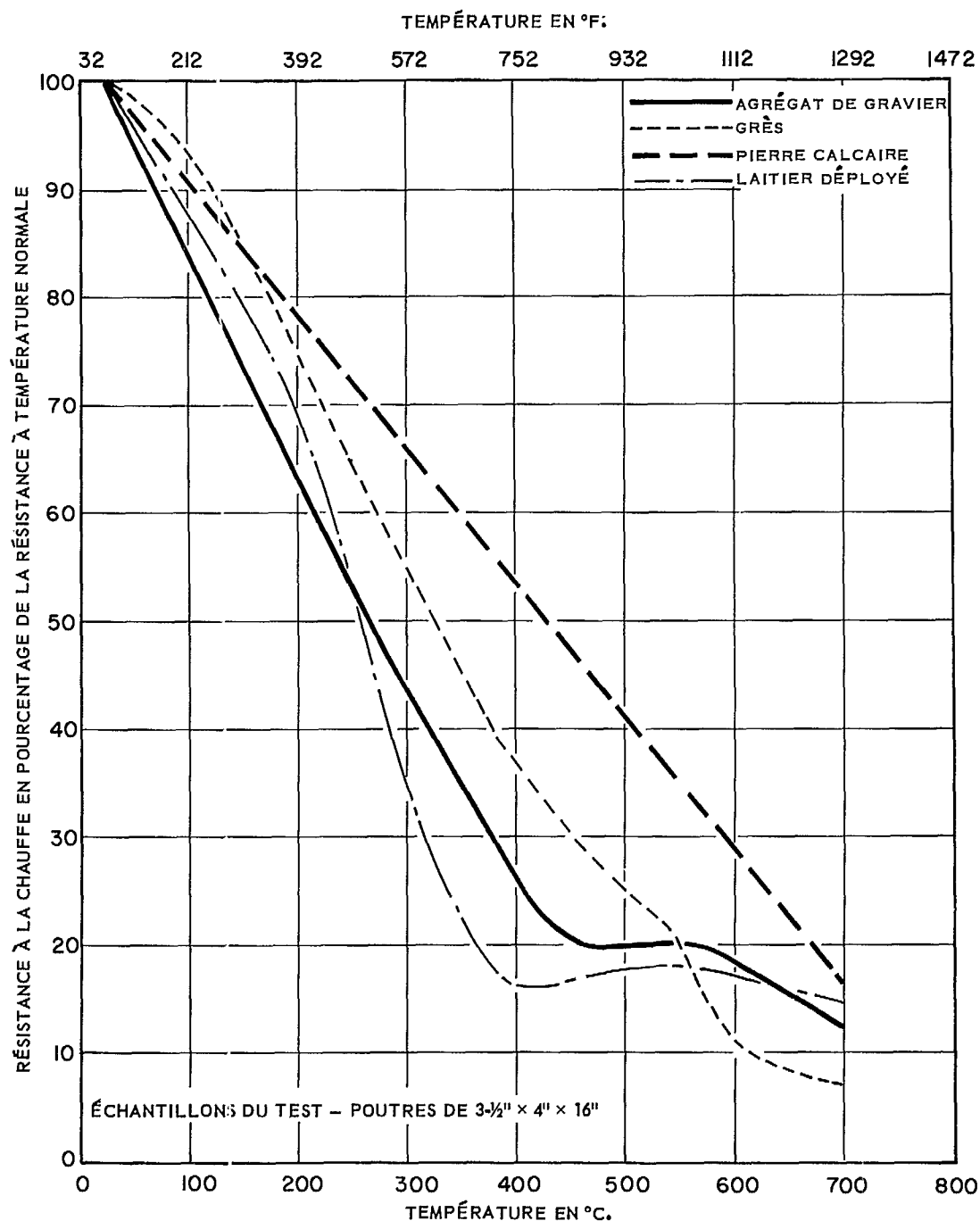


FIG. 10.6.2 PERTE DE LA RÉSISTANCE À LA FLEXION DU BÉTON DE CIMENT PORTLAND SOUMIS À LA CHALEUR ET ESSAYÉ À LA TEMPÉRATURE DE LA PIÈCE. (ADAPTÉ DE "EFFET DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES SUR LE BÉTON COMPOSÉ DE DIFFÉRENTS AGRÉGATS" PAR N.G. ZOLDNERS.)

10.7 Béton précontraint — Le béton qui compose les structures de béton précontraint réagit de même façon que le béton décrit à l'alinéa 10.6. Toutefois, dans des conditions égales de charges, les pièces en béton précontraint tendent à être moins massives que les pièces en béton armé correspondantes. Il s'ensuit que le pourcentage du béton affecté par le feu tend à être plus élevé dans le premier cas que dans le second cas. Habituellement, un effet encore plus désastreux du feu, est celui où les tiges (ou câbles métalliques) en acier de haute tension à la traction sont soumis à une température élevée, ce qui peut causer un allongement différentiel entre le béton et les tiges et entraîner une perte de précontrainte. Il existe aussi le danger que certaines propriétés que l'acier doit posséder pour résister à une tension continue durant de longues périodes de temps, soient détruites par des modifications survenues dans sa structure métallurgique. De plus, les poutres en béton précontraint ne sont généralement pas employées dans des charpentes continues dont les poutres et les piliers forment une unité. On les emploie plutôt comme pièces détachées maintenues par un simple support. La continuité d'une construction augmente considérablement la résistance d'un bâtiment ravagé par le feu et de ce point de vue les pièces de béton précontraint présentent certaines faiblesses. En dépit de ces imperfections le béton précontraint résiste bien au feu surtout quand l'architecte a eu la précaution de bien recouvrir les tiges d'acier.

10.8 Bois de charpente — La réaction du bois de charpente au cours d'un incendie dépend énormément des dimensions des pièces. L'expérience démontre que les pièces de charpente dont les sections transversales sont de grande dimension, supportent remarquablement bien l'action du feu alors que les petites pièces, telles que les planches, jambettes et montants non protégés, peuvent être entièrement consumées. Les tests de feu standards qu'on a faits au Royaume-Uni, indiquent que dans le cas du bois de charpente solide et des contreplaqués de densité moyenne, des bois tendres et des bois durs, le rythme de flambage est d'environ 1/40<sup>e</sup> de pouce par minute, quoique cette cadence puisse être quelque peu ralentie en imprégnant le bois de sels ignifuges. La résistance au feu des pièces d'une construction dont les sections transversales sont de grande dimension découle du fait que le bois est un faible conducteur de la chaleur. Évidemment, du bois carbonisé n'a aucune valeur structurale, mais il est probable qu'à peine 1/4 de pouce au-dessous de la surface carbonisée, le bois n'ait rien perdu de sa résistance. Naturellement, si une pièce n'est pas soumise au feu trop longtemps, il est possible que le volume de bois demeuré intact soit capable de soutenir des charges sans défaillance. La résistance des poutres de bois au cours des tests de feu standards a donné l'indice du rapport qu'on retrouve dans l'équation 10.8.1.

$$r^{0.5} = 1/2 (1 - T s^{0.5}) \left(1 - \frac{T}{2s^{0.5}}\right)^2 \quad - 10.8.1$$

quand  $r$  = le rapport de la charge pratique à la résistance limite

$s$  = le rapport de la hauteur de la poutre à la largeur

$$T = \frac{t}{20a^{0.5}}$$

$t$  = la résistance au feu en minutes

$a$  = la section transversale de la poutre en pouces carrés

Quoique cette équation ne comprenne pas tous les facteurs qui influent sur la résistance au feu (tels que la distribution d'humidité dans une pièce et le fait que les bords en ont été ou non chanfreinés), elle démontre que la résistance du bois de charpente dépend de ses dimensions, de sa forme et de sa solidité. En général, la résistance des planchers et des cloisons en bois dépend de leur assemblage. Dans les assemblages à rainures et à languettes, l'épaisseur de la languette fait obstacle aux flammes après que les planches se sont contractées sous l'effet de la chaleur. Le planchéage à joints unis n'est guère efficace lorsqu'il s'agit de couper le chemin aux flammes.

10.9 Quoique cette étude traite principalement des pièces de charpente, il existe beaucoup de matériaux employés dans la construction d'un bâtiment, qui peuvent intensifier ou diminuer les effets d'un incendie. Ils sont trop nombreux pour les citer en détail mais il faudrait probablement mentionner les propriétés ignifuges du gypse, de la chaux et de l'amiante. Toutefois, si le lecteur désire de plus amples renseignements, il peut se reporter à "Taux de résistance au feu, 1961" Supplément n° 2 au Code national du bâtiment du Canada. Ce supplément donne un excellent compte rendu de la résistance au feu d'une vaste gamme de combinaisons de matériaux de construction.

## CHAPITRE 11

### EFFETS DU FEU SUR LES FORÊTS ET LES RÉCOLTES VIVRIÈRES

11.1 Au cours d'une attaque nucléaire, il y a danger que de précieuses régions boisées, des récoltes de grains et de fourrage, soient détruites par les incendies qui se déclarent au-delà des limites d'une ville-cible. Cependant, nous ne prétendons pas que les pertes éprouvées seraient plus considérables que celles qui découlent des incendies en temps de paix. Nous croyons plutôt qu'elles pourraient être plus coûteuses, parce qu'elles s'ajouteraient aux dommages subis par l'industrie dans les villes-cibles. Quoiqu'il en soit, il n'est pas sûr que des incendies graves éclateraient dans les forêts par suite de l'émission de chaleur radiante. Pour cette raison, il est peut-être utile de parler brièvement des conditions qui sont à l'origine de vastes incendies dans les forêts et les herbages.

11.2 Feux de forêt — La gravité des pertes attribuables aux feux de forêt dépend de l'étendue de la région boisée et du genre d'arbres qui la composent. En général, les forêts d'arbres à feuilles en aiguilles, tels que le pin, le sapin et le sapin-ciguë sont plus ravagées par les incendies que les forêts d'arbres à larges feuilles comme le bouleau et le chêne. Cela découle non seulement de la nature même des arbres mais aussi du fait que les forêts d'arbres à feuilles en aiguilles sont souvent beaucoup plus étendues que les forêts d'arbres à larges feuilles. Dans un cas comme dans l'autre, les incendies se propagent dans les matières combustibles du sol forestier. Elles comprennent les broussailles et les substances organiques mortes, telles que les feuilles ou aiguilles et les brindilles qui sont tombées des arbres et se sont accumulées pendant longtemps. Quand ces substances sont sèches, elles s'enflamment facilement et l'incendie peut gagner très rapidement dans les matières combustibles plus ou moins rapprochées. Quand leur teneur en humidité est élevée, ces substances s'enflamment moins facilement et le feu est plus lent à prendre ou même ne se propage pas du tout. Moins fréquemment, le feu peut se propager par les cimes des arbres mais, en général, les feuilles vertes ne s'enflamment pas aussi facilement que les substances desséchées et mortes qui jonchent le sol. Cependant, le feu se répand fréquemment à la cime des arbres quand le sol forestier est en proie aux flammes. Quand cela se produit, il y a danger que les brandons soient transportés par le vent et qu'ils enflamment d'autres matières combustibles qui sont bien au-delà de la ligne d'avance de l'incendie. Habituellement, le feu carbonise à une profondeur d'environ un demi-pouce le tronc des arbres dont le diamètre dépasse quelques pouces. Et fréquemment, quand le dommage est considérable, les arbres ne survivent pas au sinistre. Même si le bois à l'intérieur de la surface carbonisée est intact et utilisable, il est nécessaire de le récupérer peu après l'incendie avant qu'il se décompose. Toutefois, les plus graves conséquences des incendies de forêt sont, qu'en général, ils rabougrissent les arbres qui n'ont pas atteint leur développement normal.

11.3 Comme ce sont principalement les matières qui jonchent le sol forestier, qui alimentent les incendies de forêt, on peut jusqu'à un certain point prédire les risques d'incendie en estimant le seuil d'inflammation de ces matières. Les tableaux qui fournissent les données qualitatives de ces risques sont préparés par le ministère des Forêts du gouvernement canadien. En général, les risques d'incendie sont minimes lorsque le sol est couvert de neige ou par temps pluvieux. Par ailleurs, durant une période de sécheresse, les risques d'incendie augmentent. Les risques d'incendie peuvent devenir alarmants quand l'humidité relative est très basse et quand un vent sec contribue à propager l'incendie à travers la forêt. Cela est surtout vrai dans les vastes forêts d'arbres aux feuilles en aiguilles car les matières inflammables y brûlent habituellement bien tandis que l'assèchement y est souvent accéléré par le peu d'ombre projetée au sol par un feuillage clairsemé à la cime. Les forêts d'arbres à larges feuilles sont moins expo-

sées à l'incendie. Cela est attribuable au fait que les feuilles mortes ne brûlent d'ordinaire pas aussi facilement que les aiguilles et que fréquemment, les combustibles sur le sol sont bien protégés de l'effet desséchant du soleil. De plus les régions d'arbres à larges feuilles sont souvent moins étendues que celles dont les arbres ont des feuilles en aiguilles et les pertes sont comparativement moindres.

11.4 On peut conclure que les risques d'incendie de forêts au cours d'une attaque nucléaire dépendent largement du genre d'arbres et des conditions atmosphériques qui précèdent une attaque. Naturellement, ils dépendent aussi de l'émission thermique de l'arme (voir figure 7.16.2) et de l'atténuation atmosphérique (voir figure 4.10.1). Comme l'ombre ne s'étend pas partout sur le sol des forêts, on peut supposer que les valeurs de  $T_B$  et  $T_W$  représentent l'unité dans les équations 5.12.1, 5.12.2 et 5.12.3.

11.5 Les incendies des récoltes vivrières – Les risques d'incendies qui menacent les récoltes et les pâturages au cours d'une attaque nucléaire dépendent aussi du temps et de la puissance de l'arme. En règle générale, l'inflammation dépend surtout de l'humidité donc, en grande partie, des saisons et du climat. Dans l'ouest du Canada, les risques d'incendies, dans les champs, des récoltes de céréales, telles que le blé, l'avoine et l'orge, sont plus élevés durant la période allant de la moisson jusqu'au début de l'hiver. Le risque d'incendie est habituellement minime au cours des semailles et jusqu'à l'époque de la moisson. De même le seuil d'inflammation des pâturages est le plus bas à compter du mois de juillet et jusqu'au début de l'hiver. En d'autre temps, le risque diminue sensiblement ou n'existe même pas. Dans l'est du Canada, le risque d'incendie dans les chaumes est appréciable seulement durant une très courte saison qui semble être limitée aux mois d'août et de septembre. Les champs légèrement pâturés ne contiennent guère de matières combustibles sauf peut-être durant de courts espaces de temps au printemps et en automne. Un incendie considérable se déclare rarement quand les récoltes de céréales portent des grains. Les risques d'incendies sont plus grands après la moisson alors que les épis ont été enlevés et que le fourrage seul demeure.

11.6 Si un incendie se déclare et se propage rapidement dans les récoltes, les pertes encourues dans les Prairies seront probablement plus grandes que celles que subiraient les provinces de l'est du Canada. Cela découle des étendues de terrain cultivé généralement plus grandes qui se trouvent entre les coupe-feu dans les Prairies. Néanmoins, avant l'époque de la moisson, il est probable que les dommages se limiteront aux régions desséchées par la chaleur radiante des armes nucléaires. Après la moisson, il est possible qu'une grande partie de la pâture des bestiaux soit perdue lorsque l'incendie détruit le fourrage. Toutefois, cette perte se limite à une seule pousse annuelle, alors qu'il faut souvent compter plusieurs années avant que les jeunes arbres détruits par les incendies de forêt, soient remplacés. A cet égard, les pertes agricoles sont peut-être moins graves.

11.7 Ce qui précède nous permet de conclure qu'une tentative délibérée d'incendier les forêts et les récoltes au moyen d'un engin nucléaire exige une étude minutieuse des conditions atmosphériques et des saisons propices. Quoiqu'il en soit, les pertes qui en résulteraient ne seraient pas plus considérables que celles qu'on aurait à déplorer en temps de paix.

## CHAPITRE 12

### COMMENT RÉDUIRE LES PERTES DUES AUX INCENDIES AU COURS D'UNE ATTAQUE NUCLÉAIRE

12.1 Les principes qui régissent la réduction des pertes imputables aux incendies, ne varient pas, qu'on soit en temps de guerre ou de paix. On peut les répartir en deux groupes. Le premier comprend l'élimination des risques inutiles afin de prévenir les incendies. On peut considérer cette précaution comme une mesure de défense passive. Le second groupe comprend les mesures à prendre pour combattre les incendies qui ont été provoqués. Ces dispositions représentent une défense active. En raison des nombreux incendies qui seraient probablement provoqués par une attaque nucléaire, nous devons donner une certaine considération aux deux formes de défense.

12.2 Dans les questions de défense active, il est habituel de se fier en grande partie à la compétence et à l'expérience des services locaux des incendies. Cependant, il est bon de se rappeler que le service régulier est d'ordinaire limité quant à l'équipement, la main-d'oeuvre et l'approvisionnement d'eau, qui répondent aux exigences en temps de paix mais ne suffiraient vraisemblablement pas à combattre le très grand nombre d'incendies qui pourraient éclater au cours d'une attaque nucléaire. Cette considération mise à part, il existe toujours le danger que la conduite principale de distribution d'eau soit endommagée et que la lutte contre l'incendie devienne impossible. De plus, si les retombées locales étaient intenses, les risques de radiation résiduelle rendraient la lutte contre les incendies violents impraticable pendant longtemps. Conséquemment, on doit exercer son jugement, et s'assurer que le personnel régulier des services des incendies est affecté aux endroits où il rendra le plus de services. Il est évident qu'il est inutile de vouloir combattre tous les incendies lorsque les ressources sont éparses et partant inefficaces. Généralement, le meilleur plan est de choisir, si possible, les régions où les efforts seront les mieux récompensés et où l'on est raisonnablement sûr de trouver de l'eau. Ces régions seront probablement situées près des limites des zones d'inflammation primaires. Toutefois, si les retombées locales sont trop intenses, la lutte contre les incendies devra se poursuivre dans les secteurs où la radiation est tolérable.

12.3 Ces restrictions possibles de l'emploi du service des incendies impliquent que la tâche d'éteindre les incendies retombera sur les occupants des immeubles. Au cours de la Seconde Guerre mondiale on a, dans de nombreuses villes européennes, eu largement recours à la population civile pour combattre les petits incendies avant qu'ils ne deviennent trop violents pour pouvoir être maîtrisés par des volontaires inexpérimentés. Les résultats ont démontré que cette confiance était méritée car plusieurs petits incendies combattus avec promptitude ont été maîtrisés sans trop de difficulté et avec des pertes minimales. Advenant une attaque nucléaire, il est essentiel que les gens puissent s'acquitter de ces tâches dans l'intervalle compris entre la détonation et la manifestation possible de retombées locales intenses et qu'ils soient avertis du fait qu'ils pourraient bien n'être pas secondés par le personnel expérimenté d'un service des incendies. Cela exige un certain sang-froid que tout le monde ne possède pas. La meilleure méthode pour former des équipes civiles est d'entraîner un grand nombre de personnes et de leur enseigner les rudiments de la lutte contre l'incendie. Cet entraînement leur permettra peut-être de surmonter la panique bien naturelle qui s'empare des victimes d'une catastrophe et d'agir promptement pour éviter que les incendies ne se propagent.

12.4 Un grand nombre de bâtiments sont pourvus d'appareils pour combattre les incendies. Certains d'entre eux sont munis d'extincteurs automatiques d'incendie, de volets à guillotine, d'extincteurs portatifs et de dévidoirs; dans d'autres on se fie à des seaux de sable et d'eau. En vue du fait que les conduites de distribution d'eau ou que les câbles de distribution d'électricité peuvent être mis hors d'usage, il semblerait que l'équipement sur lequel on peut compter davantage au cours d'une attaque nucléaire, soit l'équipement portatif. On ne saurait prétendre que les seaux d'eau et de sable ou les extincteurs portatifs sont très efficaces près du point de chute mais il est fort probable qu'à mesure qu'on se rapprochera des limites de la zone d'incendie primaire, on pourra les utiliser avec profit. La raison en est qu'il existe de moins en moins de matières inflammables à mesure que l'on s'éloigne du point de chute. Les points d'inflammation tendent à diminuer à l'avenant et les possibilités d'éteindre les petits incendies augmentent d'autant. Il est donc évident qu'une provision d'eau, de seaux ou de sacs de sable, représente une prime d'assurance extrêmement modeste quand le manque d'une telle précaution peut se traduire par des pertes négligeables ou considérables. Il serait erroné de croire que les appareils d'extinction automatique ou à boyaux sont sans valeur. Tout au contraire, car si l'eau ne manque pas et que les pompes fonctionnent, ces appareils rendront de bien plus grands services que les appareils plus simples. Néanmoins, comme nous l'avons signalé précédemment, au cours d'une attaque nucléaire il existe toujours la possibilité que les services publics soient mis hors d'usage.

12.5 Plusieurs tentatives ont été faites pour établir une méthode qui permettrait de minimiser les pertes causées par l'incendie sans recourir aux moyens conventionnels. On a préconisé un épais nuage de fumée artificielle qui se dresserait entre le point de détonation et la cible. Cette recommandation est basée sur la présomption que les particules de fumée pourraient peut-être disperser et absorber la chaleur radiante, et réduire ainsi la radiation dans la zone-cible. Ce résultat est analogue à l'effet des variations de la visibilité (voir, par exemple, le tableau 7.22.1) sur les dimensions de la zone d'incendie primaire. Malheureusement, cette méthode présente un grand nombre de difficultés d'exécution. La plus patente est celle de produire un nuage de fumée assez étendu pour couvrir efficacement la zone-cible dans l'intervalle compris entre le signal d'alarme et le déclenchement de l'attaque et d'assurer que ce nuage de fumée demeure sur place en dépit des vents. Naturellement, ces difficultés sont moins grandes quand la zone-cible est petite mais, dans le cas des grandes villes, ces difficultés sont énormes.

12.6 La défense passive contre les incendies en temps de paix prend plusieurs formes. L'une des plus connues est la loi qui exige que les immeubles soient construits avec des matériaux ignifuges et soient assez éloignés les uns des autres, ce qui retardera la propagation de l'incendie. Il a été signalé (voir l'alinéa 8.9) que les lois sur les bâtiments présentement en vigueur, sont probablement basées sur l'emploi économique du terrain, ce qui ne permet pas toujours de laisser un espace suffisant entre les constructions et d'assurer ainsi une grande protection contre les risques d'incendie. Jusqu'à un certain point, les mêmes raisons d'économie s'appliquent aux matériaux de construction. Il ressort donc qu'en temps de paix, on se fie sur la prompte arrivée des services d'incendie pour maîtriser les flammes. En raison des conditions qui peuvent régner au cours d'une attaque nucléaire, cette hypothèse n'est pas valable en temps de guerre. Par conséquent, cette forme de défense passive peut être considérée d'une valeur limitée dans les régions très peuplées.

12.7 Les services des incendies considèrent qu'une maison bien tenue est une protection fondamentale contre les incendies en temps de paix. En temps de guerre, ce souci de l'ordre prend beaucoup plus d'importance. Il est juste de supposer que le risque d'incendie dépend tout autant du nombre que du genre de matières inflammables qui traînent ici et là. On peut donc conclure qu'advenant une attaque nucléaire, l'enlèvement et la destruction des matières inflammables pourraient peut-être réduire au minimum le nombre des petits incendies que nous aurions à combattre. De même, il est important d'insister sur les avantages des tissus incombustibles ou des

tissus traités pour les rendre ignifuges, ce qui diminue le risque d'une propagation rapide de l'incendie. En fait, le jugement et les précautions aidant, on peut supposer que ces simples mesures de défense passive réduiraient de beaucoup les pertes dues aux incendies au cours d'une guerre nucléaire.

12.8 Ces constatations générales permettent de conclure que des mesures de défense passive et active, simples et peu coûteuses, prises par les occupants d'immeubles, seront probablement fort utiles pour réduire les pertes dues aux incendies. Il est indéniable que les dommages causés par le feu après une attaque nucléaire seront énormes, mais il est sage de prendre les précautions qui réduiront peut-être les pertes matérielles et sauveront des vies humaines.





## ANNEXE A

### ÉMISSION THERMIQUE DES ENGINES EXPLOSANT À HAUTE ALTITUDE

A.1 A l'alinéa 4 du chapitre 3, une distinction a été établie entre les engins nucléaires qui explosent à une altitude inférieure à 100,000 pieds et ceux qui explosent à des altitudes plus élevées. Les premiers ont fait l'objet des chapitres 3, 4 et 5 tandis que la présente annexe traitera des derniers. Il y a deux raisons d'étudier séparément ces engins. En premier lieu, il existe une différence très prononcée entre les caractéristiques de leur émission thermique; il convient donc de les étudier séparément. En second lieu, nous manquons de renseignements sur les explosions à haute altitude de sorte que leur étude a nécessairement un caractère plus qualitatif.

A.2 On est mal renseigné sur les effets des engins qui explosent à des altitudes variant entre 100,000 et 150,000 pieds. Il est cependant possible de prédire la nature et la quantité de chaleur qui se dégage des engins explosant à plus de 150,000 pi. et il y a lieu de s'en tenir à l'étude de ces derniers.

A.3 On se souvient qu'il a été dit au chapitre 3 que la libération d'énergie qui se produit lorsqu'un engin, en explosant, émet des rayons X dans les gaz atmosphériques environnants crée une boule de feu. Les gaz environnants deviennent incandescents et la chaleur se dégage de nouveau de la surface de l'espace rendu chaud lequel sert plus ou moins de radiateur intégral. Une partie de cette chaleur peut se heurter à des cibles inflammables et y mettre le feu. De la même façon, les explosions à haute altitude activent les molécules et les atomes des gaz atmosphériques. Cependant, comme la densité de l'air est beaucoup moins forte à de hautes altitudes, il y a également moins de chance que les rayons X se heurtent à des molécules ou à des particules atomiques près du point d'explosion. Il en résulte que les zones d'action réciproque sont beaucoup plus vastes que dans le cas des engins qui explosent à de basses altitudes. Il se produit donc de grosses boules de feu dont le diamètre a souvent plusieurs milles et dont les surfaces peuvent de nouveau dégager de la chaleur. On peut en conclure que l'étendue de la cible ou, autrement dit, la zone probable d'incendies primaires a tendance à être plus grande que dans le cas d'un engin de puissance comparable qui explose à basse altitude.

A.4 On pourrait croire qu'à cause de cette augmentation des dimensions de la boule de feu, les dommages causés par la chaleur seront plus considérables à mesure que l'altitude du point d'explosion s'élève. La validité de cet argument est néanmoins limitée. Au-dessus d'environ 280,000 pieds d'altitude, l'air est si rare qu'il n'existe pour ainsi dire pas. Par conséquent au-delà de cette altitude, comme il n'y a pas de gaz atmosphériques, il ne se produit pas de boule de feu. L'effet est plutôt curieux. A supposer qu'un engin explose, mettons à 350,000 pieds, la plupart des rayons X se répandent dans la stratosphère où il n'ont pas d'effet incendiaire. Toutefois une partie des rayons X libérés descend vers la haute atmosphère, se heurte aux gaz qui y sont présents et les excite. Au lieu d'une boule de feu autour du point d'explosion, il se produit une galette ou un disque de feu, dont la forme ressemble à une sphère tronquée, en deçà du point d'explosion dans les couches supérieures de l'atmosphère. La figure A.4.1 représente schématiquement les formes des boules de feu produites par des engins explosant à divers degrés de haute altitude.

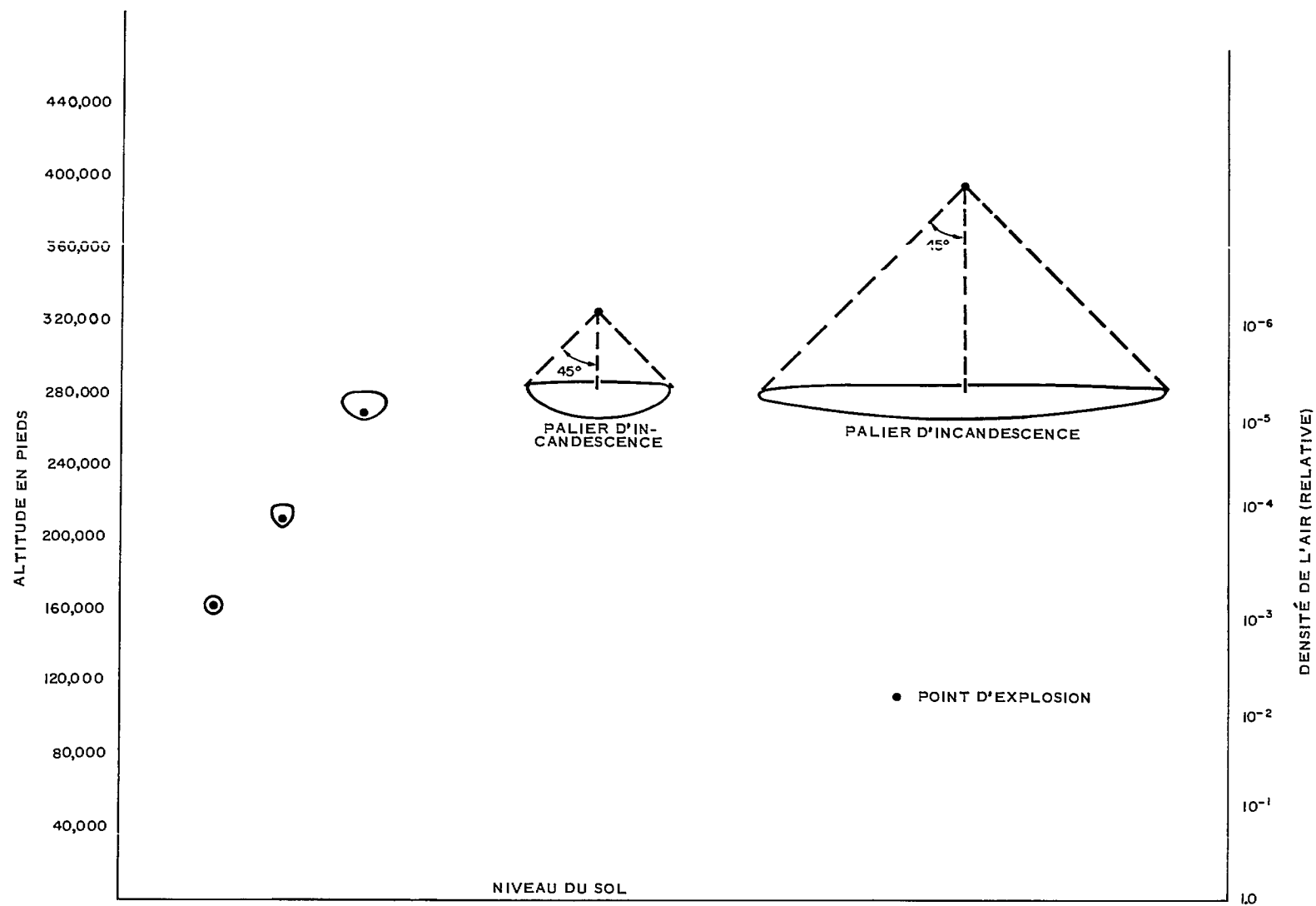


FIG. A.4.1. FORME ET EMPLACEMENT APPROXIMATIFS DE LA BOULE DE FEU DANS LE CAS D'EXPLOSIONS NUCLÉAIRES DE TRÈS GRANDE PUISSANCE À CINQ ALTITUDES CHOISIES ARBITRAIREMENT.

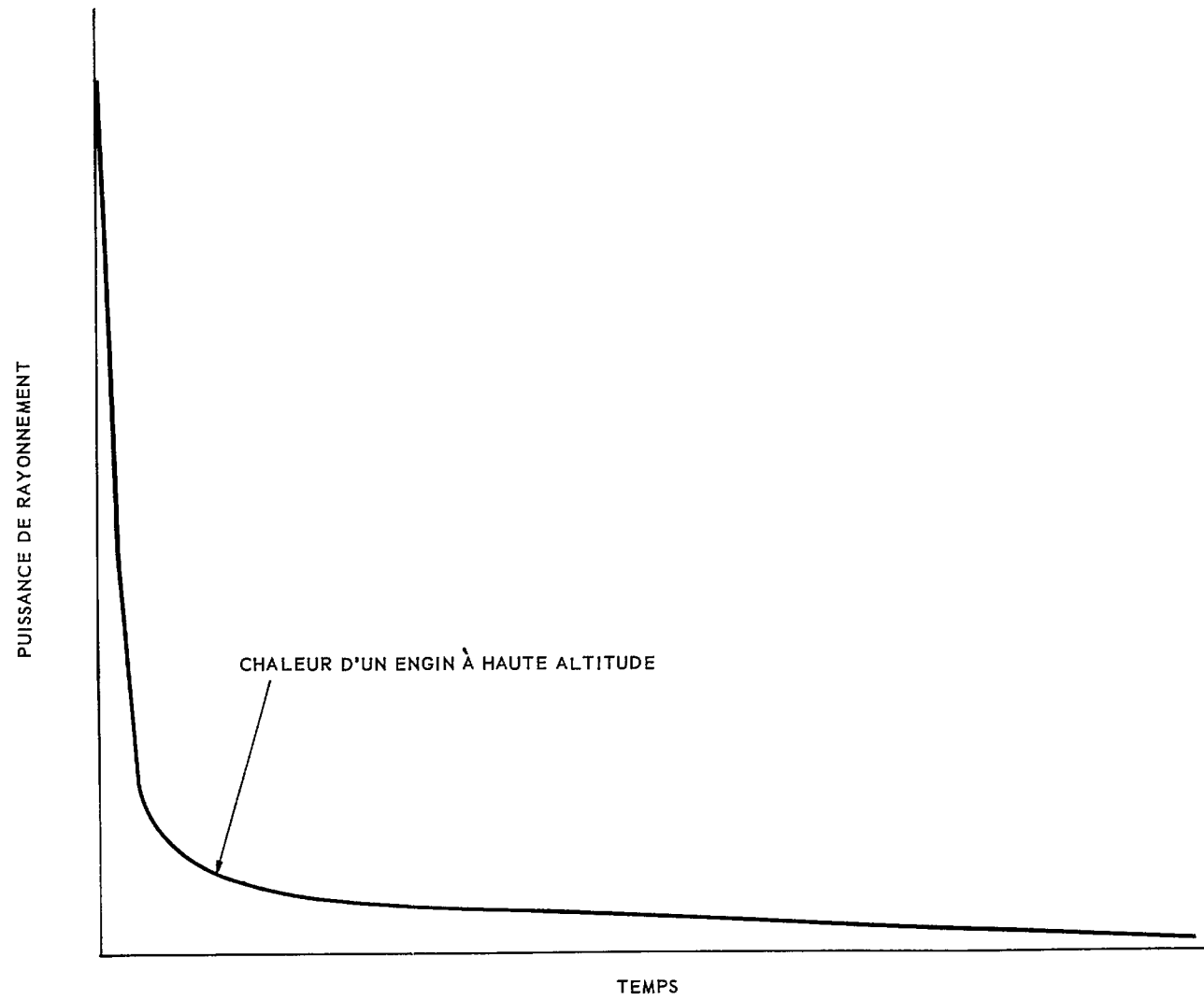


FIG. A.5.1 GRAPHIQUE DU RAPPORT PUISSANCE-TEMPS D'UNE EXPLOSION NUCLÉAIRE À HAUTE ALTITUDE

A.5 Il a été signalé à l'alinéa 3.5 que dans le cas des explosions à basse altitude, la boule de feu est obscurcie au tout début de sa formation par une tête de choc qui se place devant elle. Il en résulte une décharge apparente de deux impulsions de chaleur deux fois irradiées. Lors des éclatements à haute altitude, la faible densité de l'air empêche la formation rapide d'une puissante tête de choc ce qui a pour résultat qu'une partie considérable de la chaleur se dégage avant que le choc puisse sensiblement l'atténuer. Ainsi, il n'y a en fait qu'une seule impulsion calorifique et elle prend la forme de la courbe illustrée à la figure A.5.1. Cette courbe démontre clairement qu'immédiatement après l'explosion la puissance est très forte et décroît rapidement. La forme de la courbe suggère des formules comme  $P = Ae^{-Bt}$  ou  $P = At^{-B}$ ,  $P$  étant la puissance thermique en calories par centimètre carré par seconde,  $t$  le temps en secondes et  $A$  et  $B$  étant des nombres purs. Miller et Passell<sup>21</sup> démontrent que la courbe de libération énergétique n'obéit pas au seul rapport puissance-temps, mais se conforme plus étroitement au rapport suivant:  $P \propto t^{-x}$ , alors que  $x$  est variable et dépend de l'altitude de l'explosion, au cours de la période qui s'étend entre l'explosion même et le moment où la température de la boule de feu a baissé à environ  $10^4$  °K. Par la suite, il semble que le rapport soit approximativement représenté par la formule  $P \propto t^{-1.29}$ . Ces relations mathématiques exigent toutes que la puissance soit illimitée au temps zéro. Cela évidemment ne peut être le cas. Rogers<sup>22</sup> laisse entendre qu'on peut rendre approximativement la forme caractéristique de l'impulsion énergétique par la seconde impulsion principale d'un engin d'une puissance totale de 500 à 700 kilotonnes, explosant près du niveau du sol.

A.6 Une autre approximation possible, sans qu'on puisse établir de preuve, nous est donnée à l'alinéa 6 du chapitre 3 (voir la figure 3.7.1). On y remarque que la température qu'on note à la surface d'une boule de feu provenant d'un engin qui explose près du sol diffère beaucoup de sa température réelle. Il se peut qu'il en soit de même pour les engins à haute altitude. Que l'on suppose, à titre d'exemple, que le point culminant de la température apparente s'établisse à environ  $10^4$ °C pour tous les engins, indépendamment de leur puissance et de leur altitude d'explosion, à  $4 \times 10^{-4}$  secondes après l'éclatement. On peut donc évaluer approximativement la libération énergétique à condition de connaître la quantité correspondante d'énergie reçue. Compte tenu de ce fait, supposons que la puissance libérée varie en fonction du temps, conformément à la courbe représentée à la figure A.6.1, où l'on voit que la puissance monte en ligne droite jusqu'à un point culminant qui se produit à  $4 \times 10^{-4}$  secondes, puis décroît en se conformant à la loi  $P = (4.14 \times 10^{-5}) P_p t^{-1.29}$ , alors que  $P$  représente la puissance à n'importe quel moment  $t$ , en secondes après que le point culminant  $P_p$  ait été atteint. Si l'on connaît l'énergie qui se dégage, mettons, 1 seconde après l'explosion, il est possible de formuler l'équation A.6.1. Il se peut qu'on obtienne le résultat de l'équation A.6.2. Ainsi, si l'on suppose que  $Q_1 = 1$  calorie par centimètre carré, on peut en déduire que  $P_p = 696$  calories par centimètre carré par seconde.

$$Q_1 = 2 \times 10^{-4} P_p + (4.14 \times 10^{-5}) P_p \int_{4 \times 10^{-4}}^{1.0} t^{-1.29} dt \quad - A.6.1$$

alors que  $Q_1 =$  l'énergie totale libérée 1 seconde après l'explosion

$$Q_1 = 1.436 \times 10^{-3} P_p \quad - A.6.2$$

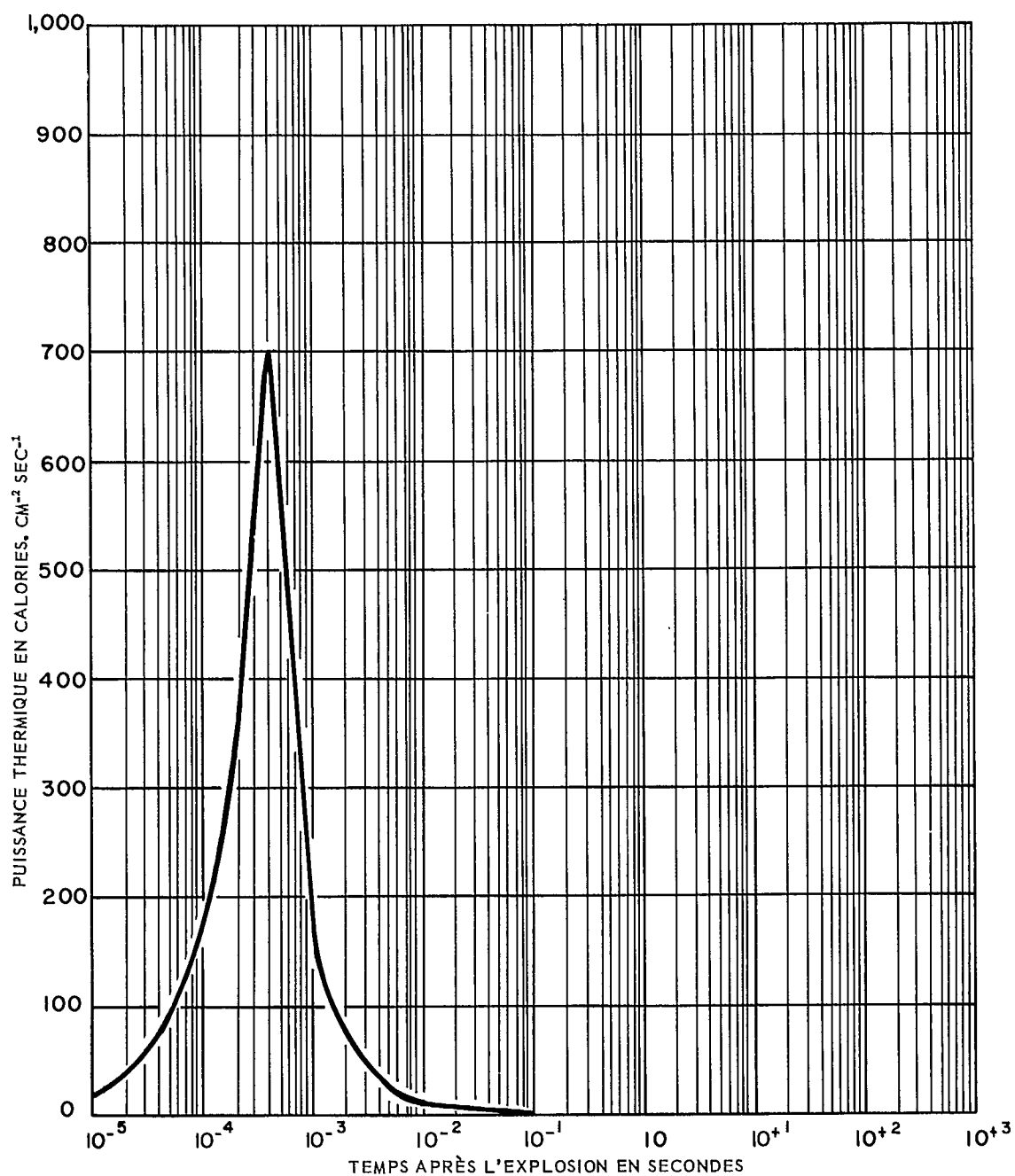


FIG. A.6.1 VARIATION PUISSANCE-TEMPS HYPOTHÉTIQUE DE L'ÉMISSION THERMIQUE D'UNE ARME EXPLOSANT À HAUTE ALTITUDE QUI LIBÈRE 1 CALORIE PAR CENTIMÈTRE CARRÉ UNE SECONDE APRÈS L'EXPLOSION (ON TROUVERA À L'ALINÉA A.6 L'EXPLICATION DU GRAPHIQUE).

On ne peut prétendre que cette approximation donne une image fidèle du mode de libération d'énergie d'un engin à haute altitude; néanmoins, elle a l'avantage de ne pas se fonder sur la supposition évidemment fausse que la puissance maximum est presque illimitée au temps zéro après l'explosion.

A.7 Miller et Passell<sup>21</sup> démontrent que la quantité d'énergie qui est libérée sous forme de chaleur capable de causer des incendies à travers une atmosphère transparente (c.-à-d. où il n'y a pas de pertes par diffusion ou réflexion) représente entre 25 et 35 p. 100 de la puissance totale de l'engin. Cette marge vaut pour les altitudes d'explosion variant entre environ 150,000 et 260,000 pieds. Pour représenter ces conditions, ils ont tracé deux groupes de courbes illustrées en partie aux figures A.7.1 et A.7.2. Tandis que les premières montrent la somme de chaleur qui se dégage au point de chute relativement à une gamme étendue de puissances et d'altitudes, les secondes montrent comment la libération d'énergie thermique diminue à mesure que la distance horizontale à partir du point zéro augmente.

A.8 Passell<sup>23</sup> a modifié son étude sur la chaleur qui se dégage d'un engin explosant à haute altitude de façon à inclure des pertes atmosphériques qui tiennent davantage compte de la réalité. A cette fin, il a comparé l'émission thermique de l'engin à l'énergie lumineuse du soleil projetée au niveau du sol perpendiculairement aux rayons du soleil. Bien que cette comparaison ne soit pas tout à fait juste, elle permet de calculer les pertes de chaleur dans l'atmosphère. La figure A.8.1 illustre une partie des résultats de ses recherches; la fraction de la radiation extra-terrestre qui se dégage à travers une atmosphère transparente sur une surface perpendiculaire aux rayons directs est tracée par rapport à un angle d'élévation au-dessus de l'horizontale jusqu'au centre de la boule de feu (ou de la galette de feu). D'après cette figure on peut constater qu'environ 80 p. 100 du dégagement thermique reproduit à la figure A.7.1 se trouve au point zéro. Cela, toutefois, ne tient pas compte de l'effet qu'a la présence de nuages qui se forment surtout bien au-dessous de la limite inférieure d'élévation de 150,000 pieds dont traite la présente étude. Passell<sup>23</sup> a tenté d'établir un lien entre la transmission de la chaleur et l'épaisseur ainsi que l'étendue des nuages. La figure A.8.2 illustre en partie ce rapport. Il convient de remarquer que la courbe est un tracé graphique de la transmission au niveau de la mer, par temps clair, en fonction de l'épaisseur des nuages. Cela signifie que si l'on veut en arriver à une évaluation assez juste de la chaleur dégagée à n'importe quel point de la zone-cible, il faut multiplier une valeur quelconque de chaleur dégagée prise à la figure A.7.1 par les coefficients correspondants donnés aux figures A.7.2, A.8.1 et A.8.2. Un exemple suffira à illustrer ce fait:

Exemple      On suppose qu'un engin d'une puissance totale de 20 mégatonnes explose à une altitude de 280,000 pieds.

On demande de trouver la quantité de chaleur qui se dégage au point zéro.

- a) Par temps légèrement brumeux
- b) Par temps très couvert

Solution      D'après la figure A.7.1

la libération thermique      =      5 calories. cm<sup>-2</sup>

D'après la figure A.7.2

$$\frac{\text{Puissance reçue à un point éloigné du point zéro}}{\text{Puissance reçue au point zéro}} = 1.0$$

D'après la figure A.8.1

$$\frac{\text{Portion de la radiation extra-terrestre parvenant à la surface du sol (élévation = 90°)}}{\text{}} = 0.8$$

D'après la figure A.8.2

$$\frac{\text{Transmission par les nuages par temps légèrement brumeux comparativement à la transmission par temps clair}}{\text{}} = 0.7 \text{ approx.}$$

D'après la figure A.8.2

$$\frac{\text{Transmission par les nuages par temps très couvert comparativement à la transmission par temps clair}}{\text{}} = 0.1 \text{ approx.}$$

$$\begin{aligned} \text{a) Chaleur reçue par temps légèrement brumeux} &= 5.0 \times 1.0 \times 0.8 \times 0.7 \\ &\text{calories. cm}^{-2} \end{aligned}$$

$$= 2.8 \text{ calories. cm}^{-2}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Chaleur reçue par temps très couvert} &= 5.0 \times 1.0 \times 0.8 \times 0.1 \\ &\text{calories. cm}^{-2} \end{aligned}$$

$$= 0.4 \text{ calories. cm}^{-2}$$

Réponse

On voit tout de suite par cet exemple que la nébulosité atténue sensiblement la chaleur. Toutefois les données de la figure A.8.2 se rapportent à un temps presque constamment couvert. Il est intéressant de comparer le degré de nébulosité dans un certain nombre de villes canadiennes avec les conditions atmosphériques imaginées par Passell. Le tableau A.8.1 présente un relevé des observations visuelles qui ont été faites par des observateurs du ministère des Transports près des villes indiquées, pendant dix ans, soit de 1953 à 1962. Les chiffres donnent approximativement, en dixièmes, la portion du ciel qui est cachée par des nuages au regard de l'observateur. Évidemment, si le voile nuageux est déchiré, le dégagement de chaleur dépendra de la répartition des nuages dans le ciel. Le moyen le plus facile de tenir compte de ce fait consiste probablement à faire une interpolation entre les conditions de ciel dégagé et de ciel complètement couvert à, mettons, cinq dixièmes d'obscurcissement ou à toute autre valeur choisie.



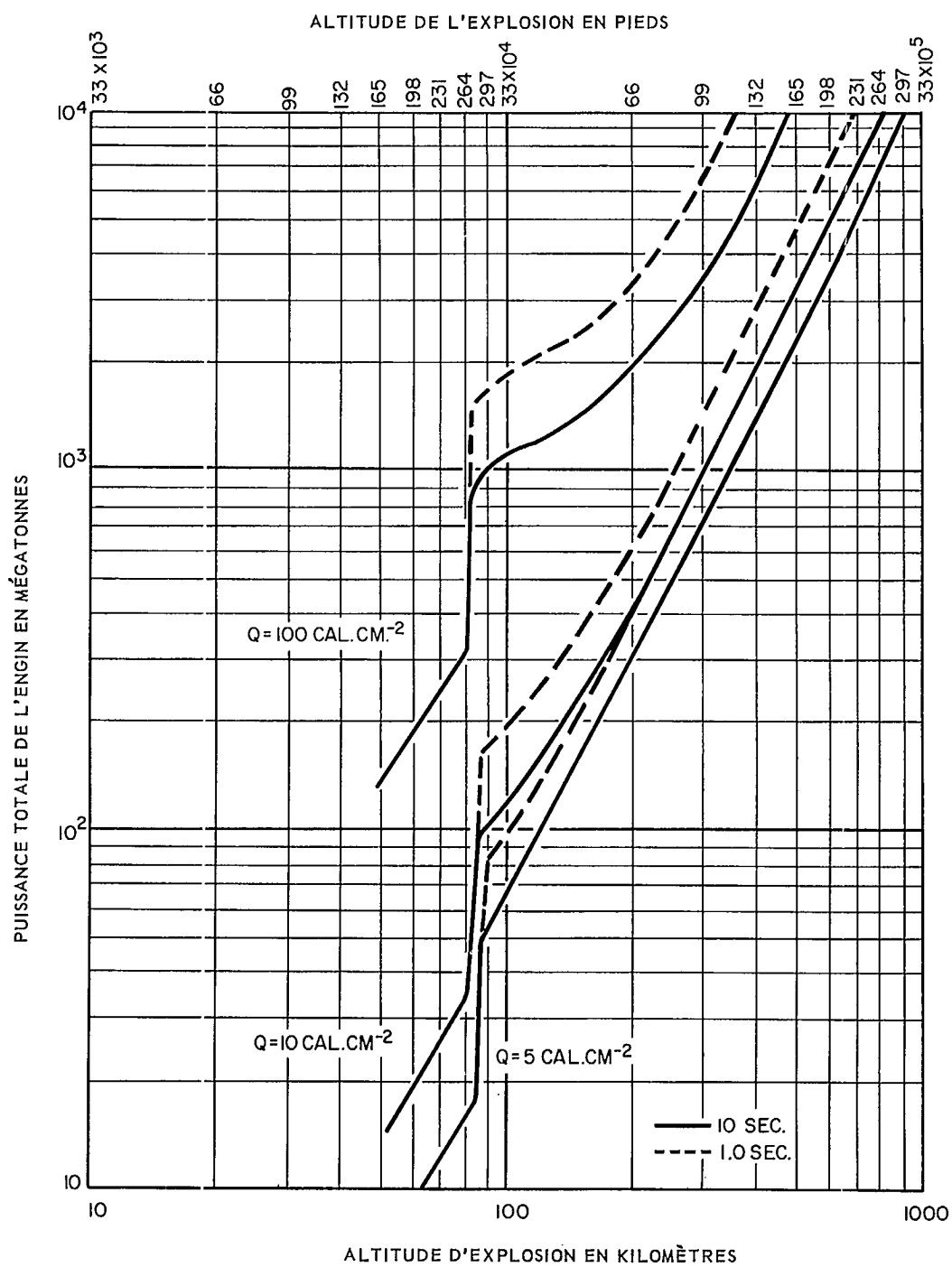


FIG. A.7.1 PUISSANCE TOTALE DE L'ENGIN REQUISE À UNE ALTITUDE DONNÉE D'EXPLOSION POUR LANCER TROIS FLUX ÉNERGÉTIQUES SUR UNE SURFACE HORIZONTALE AU POINT ZÉRO 1 À 10 SEC. APRÈS L'EXPLOSION.

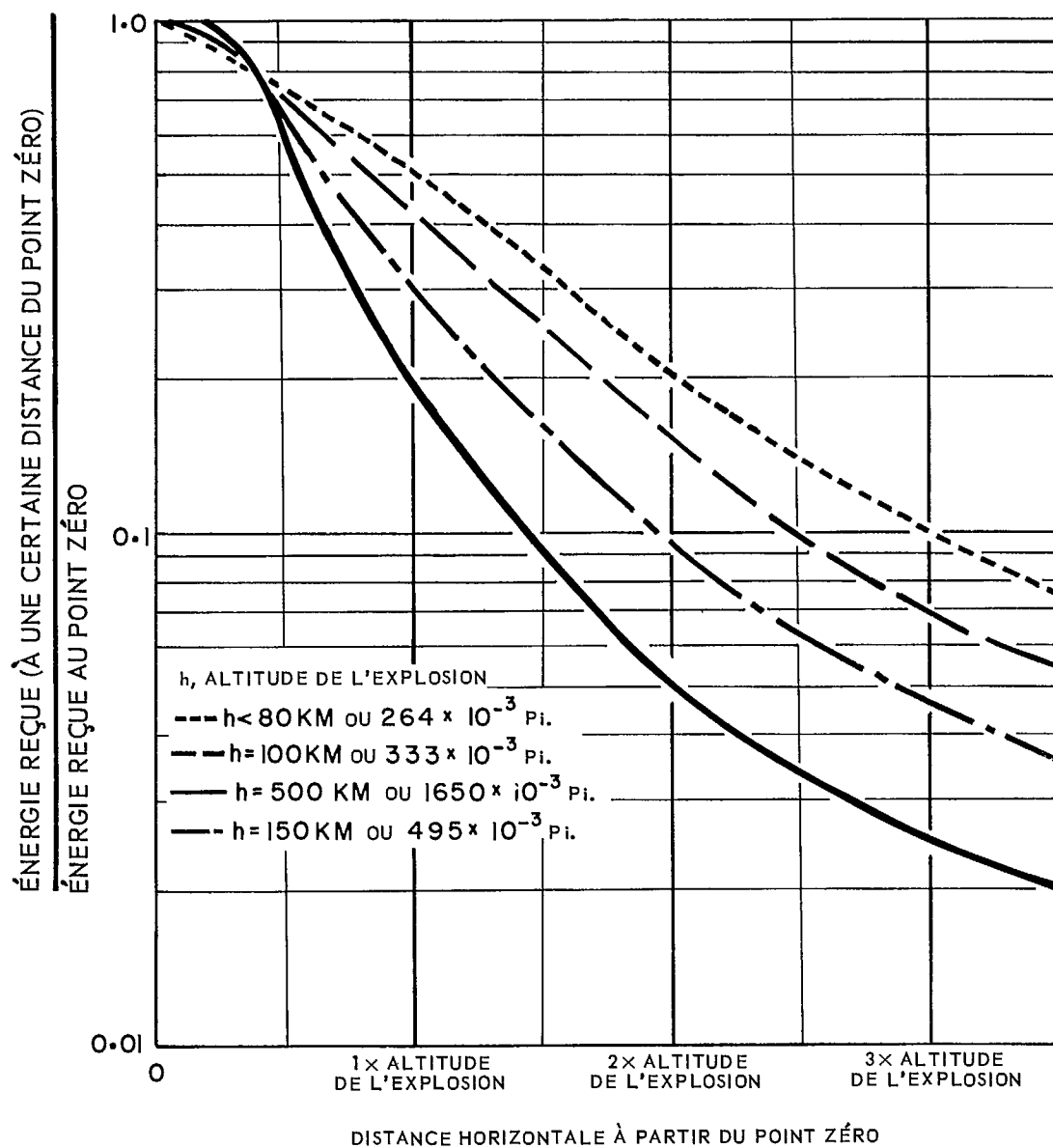


FIG. A.7.2. FLUX ÉNERGÉTIQUE REÇU PAR DES SURFACES ORIENTÉES DE FAÇON OPTIMALE, EN FONCTION DE LA DISTANCE À PARTIR DU POINT ZÉRO.

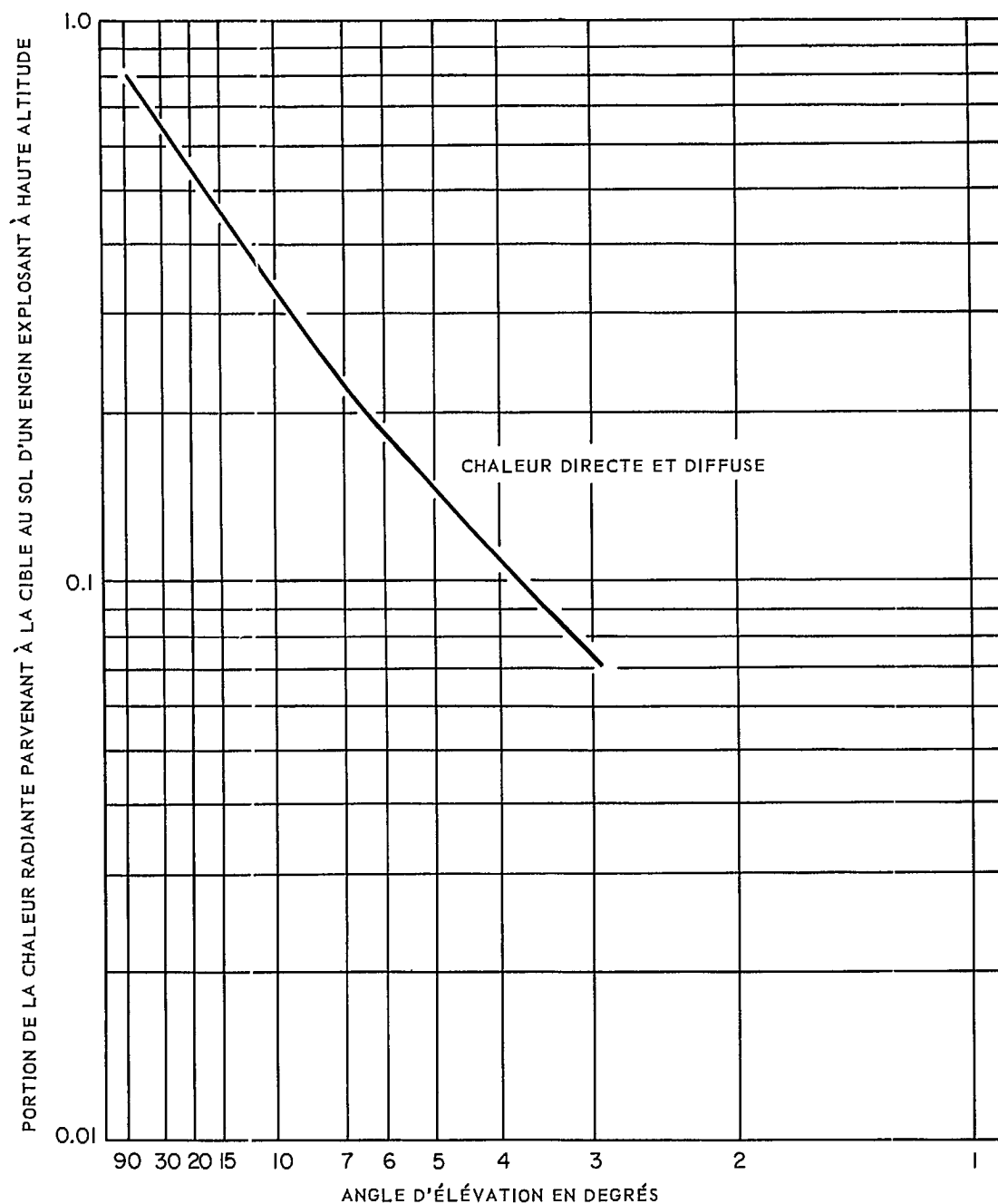


FIG. A.8.1. FACTEURS D'ATTÉNUATION ATMOSPHÉRIQUE DES EXPLOSIONS NUCLÉAIRES À HAUTE ALTITUDE EN FONCTION DE L'ANGLE D'ÉLEVATION DU RAYON AU-DESSUS DE L'HORIZONTALE PAR TEMPS CLAIR AU NIVEAU DE LA MER. (ADAPTATION DE L'OUVRAGE DE T.O. PASSELL, INTITULÉ: "TRANSMISSION PAR L'ATMOSPHÈRE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE LIBÉRÉE PAR L'EXPLOSION D'ARMES NUCLÉAIRES À UNE ALTITUDE DE 50 KM").

FRÉQUENCE DE LA NÉBULOSITÉ, EN DIXIÈMES, COMME POURCENTAGE DU TEMPS TOTAL EN UN MOIS SOLAIRE

	VANCOUVER, C.-B.			EDMONTON, ALB.			WINNIPEG, MAN.			TORONTO, ONT.			MONTRÉAL, QUÉ.			HALIFAX, N.-É.		
	0-4 Dixiè- mes	5-9 mes	10 mes	0-4 Dixiè- mes	5-9 mes	10 mes	0-4 Dixiè- mes	5-9 mes	10 mes	0-4 Dixiè- mes	5-9 mes	10 mes	0-4 Dixiè- mes	5-9 mes	10 mes	0-4 Dixiè- mes	5-9 mes	10 mes
Janvier	14.8	26.3	58.9	33.7	31.4	34.9	40.4	21.9	37.7	28.6	24.3	47.1	32.7	24.6	42.7	30.5	23.0	46.5
Février	19.6	31.6	48.8	32.4	34.6	33.0	46.2	20.4	33.4	29.7	24.8	45.5	34.2	24.3	41.5	35.3	22.5	42.2
Mars	22.0	38.7	39.3	31.0	33.5	35.5	39.8	26.2	34.0	37.5	24.0	38.5	38.2	26.8	35.0	32.5	26.6	40.9
Avril	26.1	41.7	32.2	33.6	42.2	24.2	36.6	31.3	32.1	33.7	28.6	37.7	33.8	30.1	36.1	32.5	24.6	42.9
Mai	31.8	43.1	25.1	31.3	46.3	22.4	38.1	32.2	29.7	38.3	33.7	28.0	36.4	38.1	25.5	32.4	28.2	39.4
Juin	27.4	47.2	25.4	29.2	51.7	19.1	36.2	41.4	22.4	43.0	37.4	19.6	38.1	38.9	23.0	28.2	29.6	42.2
Juillet	54.0	35.0	11.0	39.9	49.7	10.4	45.9	40.8	13.3	49.1	38.2	12.7	40.0	43.3	16.7	33.7	29.8	36.5
Août	43.4	38.1	18.5	37.8	44.1	18.1	47.4	37.2	15.4	47.9	34.8	17.3	44.7	38.8	16.5	36.1	30.9	33.0
Septembre	39.4	34.6	26.0	35.3	45.2	19.5	37.9	38.5	23.6	46.2	33.7	20.1	40.7	35.0	24.3	40.9	29.4	29.7
Octobre	23.3	36.8	39.9	35.5	41.8	22.7	39.7	30.6	29.7	42.1	30.9	27.0	37.7	31.0	31.3	39.0	26.1	34.9
Novembre	19.0	31.0	50.0	37.9	33.7	28.4	25.9	25.5	48.6	26.6	32.9	40.5	24.1	32.0	43.9	28.2	25.1	46.7
Décembre	14.8	31.6	53.6	32.0	37.4	30.6	34.3	24.5	41.2	26.5	26.1	47.4	27.8	25.9	46.3	28.4	27.5	44.1

TABLEAU A.8.1. INCIDENCE DE LA NÉBULOSITÉ AU-DESSUS DE QUELQUES VILLES CANADIENNES EXPRIMÉ EN POURCENTAGE DE TEMPS D'UN MOIS SOLAIRE. ADAPTATION DE CERTAINES OBSERVATIONS QUI ONT ÉTÉ FAITES PENDANT DIX ANS (JANV. 1953 - DÉC. 1962) PAR LA DIRECTION DE LA MÉTÉOROLOGIE DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS, GOUVERNEMENT DU CANADA.

TRANSMISSION FRACTIONNÉE DE LA CHALEUR RAYONNANTE À TRAVERS UN NUAGE AU NIVEAU DE LA MER PAR TEMPS CLAIR

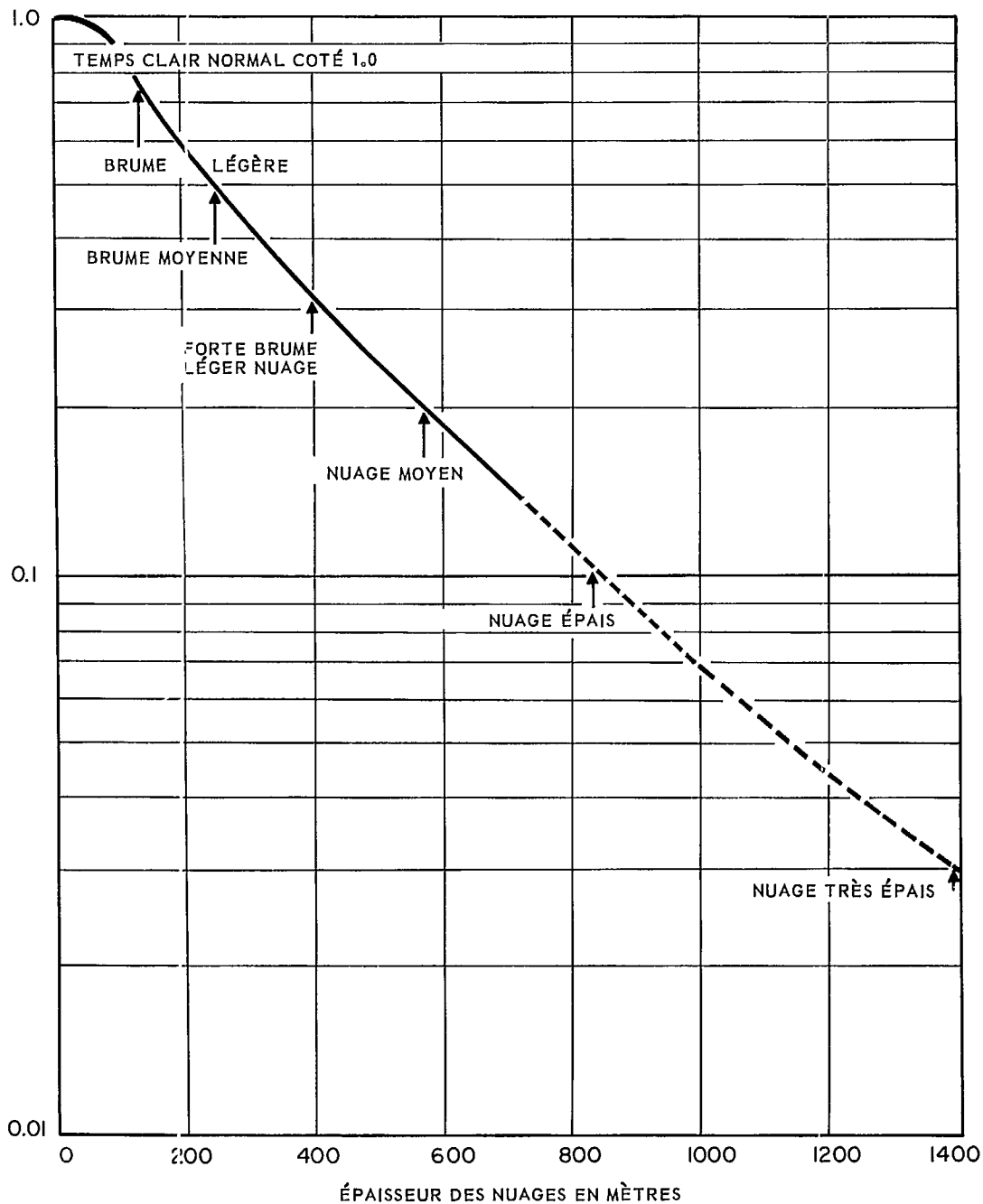


FIG. A.8.2. FACTEURS D'ATTÉNUATION ATMOSPHÉRIQUE DES EXPLOSIONS NUCLÉAIRES À HAUTE ALTITUDE EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR OU DE LA DENSITÉ DES NUAGES, D'APRÈS DES OBSERVATIONS VISUELLES. (ADAPTION D'UN OUVRAGE DE T.O. PASSELL: "TRANSMISSION PAR L'ATMOSPHÈRE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE LIBÉRÉE PAR L'EXPLOSION D'ARMES NUCLÉAIRES À UNE ALTITUDE DE 50 KM".)

DESCRIPTION DU JOURNAL	PUISSANCE (cals. cm <sup>-2</sup> , sec <sup>-1</sup> )	ÉNERGIE (cals. cm <sup>-2</sup> )
Surfaces les plus foncées	50	2.1
	75	2.5
	100	2.8
Surfaces phototypographiques	50	3.0
	75	3.0
	100	3.3
Surfaces imprimées	50	4.0
	75	4.5
	100	5.0
Surfaces vierges	50	5.5
	75	4.5
	100	5.5

TABLEAU A.11.1. PUISSANCE ET ÉNERGIE THERMIQUES REQUISES POUR PRODUIRE L'INFLAMMATION SOUTENUE DE PAPIER JOURNAL, LES CONDITIONS DE PUISSANCE ÉLEVÉE ÉTANT DE BRÈVE DURÉE.

(ADAPTATION D'UN OUVRAGE DE S. MARTIN INTITULÉ: "IGNITION OF CELLULOSIC KINDLING FUELS BY VERY BRIEF RADIANT PULSES".)

A.9 On remarquera peut-être que l'étude du dégagement thermique des engins à haute altitude n'a pas tenu compte des effets atténuants qu'ont les écrans de protection extérieurs et intérieurs de même que les vitres et les moustiquaires. Comme ces divers genres d'écrans peuvent sensiblement réduire la quantité de chaleur qui parvient aux matières très inflammables à l'intérieur des immeubles il ne faut évidemment pas négliger d'en mettre. On peut en tenir compte en utilisant les principes établis au chapitre 5.

A.10 On constate d'après la figure A.7.1 que l'énergie par surface unitaire qui parvient aux cibles au sol à la suite de l'explosion à haute altitude d'engins assez puissants n'est pas très considérable. Il a toutefois été signalé que la puissance maximum correspondante peut être très grande. Ce qui nous amène à nous demander comment peut se produire l'allumage d'une matière très inflammable. La figure 7.17.1 peut nous donner quelques notions de la réponse probable. Démontrons-le de la façon suivante. Supposons que l'hypothèse avancée au paragraphe A.6 soit juste et que la puissance absorbée soit de 1 calorie par centimètre carré (on peut constater à la figure A.7.1 que la puissance dégagée en 1 seconde ne diffère pas tellement de celle qui est dégagée en 10 secondes et ce sur une distance considérable) et que la puissance maximum soit 696 calories par centimètre carré par seconde. Supposons en outre que la cible inflammable soit un papier mat et de couleur sombre ressemblant un peu à la surface imprimée d'un journal, ayant une densité ( $\rho$ ) de 0.75 gramme par centimètre cube, une capacité de chaleur spécifique ( $c$ ) de 0.35 calorie par gramme par degré centigrade, une épaisseur ( $L$ ) de 0.0075 centimètre et une conductibilité thermique ( $K$ ) de  $2.30 \times 10^{-4}$  en unités équivalentes. Le coefficient énergétique  $Q/\rho cL$  est donc numériquement  $5.10 \times 10^2$  tandis que le coefficient de puissance,  $P\rho L/K$  est numériquement  $2.27 \times 10^4$ . Si l'on applique ces valeurs à la figure 7.17.1, il est clair qu'il en résulte une inflammation passagère. On peut en conclure que, bien que la matière inflammable puisse dégager des flammes, ces dernières disparaîtront probablement si l'on enlève la source de chaleur (voir l'alinéa 7.3).

A.11 Cette tentative d'évaluer le genre d'incendie que peuvent produire des engins à haute altitude est corroborée par l'expérience de Martin<sup>24</sup>; celui-ci a appliqué une chaleur rayonnante à des spécimens de matières inflammables au moyen d'une source d'arc au charbon et d'un miroir paraboloidal. Pendant plusieurs centièmes de seconde on a appliqué aux papiers-cibles des intensités uniformes allant jusqu'à 100 calories par centimètre carré par seconde. On a constaté que l'embrasement passager se produisait presque immédiatement après qu'on eut appliqué la chaleur. Ce qui fait qu'il était assez difficile de déterminer le début de l'inflammation soutenue car la matière souvent se consumait au point qu'il ne restait plus rien à brûler. Les constatations de Martin laissent supposer que, à moins qu'il n'y ait à proximité d'autres matières inflammables capables de prendre feu de façon soutenue par suite de l'inflammation du papier cible, il est peu probable que le feu se propage. Le tableau A.11.1 donne une partie des résultats de ces expériences. On y cite les chiffres relatifs à plusieurs parties de papier-journal qui ont été exposées aux radiations jusqu'au point d'embrasement soutenu.

A.12 Un engin à haute altitude est incapable de produire des retombées locales et l'effet du choc n'est pas aussi intense que dans le cas d'un éclatement près du niveau du sol. On a laissé entendre, toutefois, que c'est une arme incendiaire beaucoup plus efficace qu'un appareil nucléaire à basse altitude car sa distribution thermique est plus uniforme et plus vaste. Cet argument est assez juste mais n'en présente pas moins de grands désavantages pour le stratège. D'abord, on ne peut pas dire à coup sûr que les embrasements passagers vont occasionner des incendies importants, ce qui est habituellement le cas des embrasements soutenus. Ensuite, la

nébulosité a un effet atténuant appréciable qui peut réduire sensiblement les risques d'incendie dans une cible. Enfin, si l'on projetait d'attaquer simultanément un certain nombre de cibles, il n'y aurait pas moyen d'être sûr que le ciel serait suffisamment dégagé au moment de l'attaque. En somme, il semblerait qu'actuellement l'engin à haute altitude ne garantit pas des résultats aussi désastreux que ceux obtenus par un engin qui éclate près du sol.





## ANNEXE B

### PETIT GLOSSAIRE DES EXPRESSIONS UTILISÉES

B.1	Embrasement	Désigne dans ce manuel la propagation de l'incendie d'un bâtiment à d'autres. L'incendie peut se propager à un seul immeuble ou à plusieurs.
B.2	Boule de feu	Sphère lumineuse de gaz chauds qui se forme autour du point d'explosion d'un engin nucléaire.
B.3	Tempête de feu	Masse de feu stationnaire située généralement dans une zone urbaine importante où le processus de fusion est déjà avancé. Elle produit une forte attraction locale de vents vers la zone incendiée. Ces vents accroissent l'intensité des incendies et et renouvellent l'oxygène nécessaire à la combustion; ils empêchent toutefois le feu de se propager vers l'extérieur.
B.4	Kilotonne	Énergie d'une explosion nucléaire égale à celle que produit l'explosion d'un millier de tonnes de TNT.
B.5	Incendies gigantesques	Désigne dans le présent manuel un ensemble formé de plusieurs incendies d'immeubles dont la fusion est partielle ou complète.
B.6	Mégatonne	Énergie d'une explosion nucléaire égale à celle que produit l'explosion d'un million de tonnes de TNT.

## OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

1. "Effective Transmission of Thermal Radiation from Nuclear Detonations in Real Atmospheres" par Cahill, Gauvin et Johnson, Air Force Surveys in Geophysics, n° 144, U.S. Air Force Project 7674, avril 1962.
2. "A Method of Estimating Probable Ignitions of Interior Fuels by Atomic Weapon Explosion (Survey of Boston and Detroit)" rapport technique AFSWP-340, service forestier, ministère de l'Agriculture, États-Unis, février 1956.
3. "Damage to Cellulosic Solids by Thermal Radiation", par D.L. Simms, paru dans "Combustion and Flame" vol. 6, décembre 1962. Publié par Butterworth Scientific Publications, Londres, Angleterre.
4. "The Combustion of Wood" par Bamford, Crank et Malan. Mémoires de la Société philosophique de Cambridge, vol. 42 (partie II), 1946.
5. "Analytical Study of Flame Initiation" Thèse rédigée par E.K. Lawrence, département du génie chimique, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass. 1952.
6. "Damage Initiation in Organic Materials Exposed to High-Intensity Thermal Radiation" par C.C. Williams, Massachusetts Institute of Technology, Rapport technique n° 2, Laboratoire de recherches en combustibles, Cambridge, Mass. 1953.
7. "The Conduction of Heat in Solids" par H.S. Carslaw et J.C. Jaeger, publié par l'Oxford University Press, 1951, Londres, Angleterre.
8. "Experiments on the Ignition of Cellulosic Materials by Thermal Radiation" par D.L. Simms. Paru dans "Combustion and Flame" vol. 5, décembre 1961. Publié par Butterworth Scientific Publications, Londres, Angleterre.
9. "Thermal Radiation and Fire Effects of Nuclear Detonations" par S. Martin et A. Broido, USNRDL-TR-652, mai 1963. U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, San Francisco, Cal.
10. "Critical Radiant Exposures for Persistent Ignition of Cellulosic Target Complex Materials" par J. Bracciaventi et F. DeBold, Lab. Project 5046-3, Part 124, juillet 1960, Material Laboratory, New York Naval Shipyard, Brooklyn, N.Y.
11. "Thermal Radiation Damage to Cellulosic Materials Part III, Ignition of Alpha Cellulose by Pulses Simulating Nuclear Weapon Air Bursts" par S.B. Martin et W. Lai, USNRDL-TR-252, mai 1958, U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, San Francisco, Cal.
12. "Investigations on Building Fires, Part III, Radiation from Building Fires" par R.C. Bevan et C.T. Webster, National Building Studies, Technical Paper No. 5, H.M.S.O., 1950, Londres, Angleterre.
13. "Civil Défense 1961 - Hearings Before a Sub-Committee on the Government Operations, House of Representatives, 87 Congress." Statements made before Sub-Committee, Washington, D.C., U.S.A.

14. La plus grande partie des renseignements dont on s'est servi pour rédiger le chapitre 9 proviennent des ouvrages suivants:
  - "Fire and the Air War" rédigé sous la direction de H. Bond, 1946, publié par la National Fire Protection Association, Boston, Mass.
  - "Mass Fires Following Nuclear Attack" par A. Broido, qui a paru dans "Discovery", mars 1961.
  - "Meteorological Factors in Hamburg Fire Storm" par C. Ebert, publié dans "Weatherwise" avril 1963, American Meteorological Society, Boston, Mass.
  - "Fire Effects of Bombing Attacks", nov. 1950. Préparé pour la National Security Resources Board par le Civil Defense Liaison Office, Washington, D.C.
15. "The Relationship of Jet Streams to Forest Wildfires" par J. Schaefer, publié dans le Journal of Forestry Vol. 55, 1957.
16. "A Model Study of the Interaction Effects of Mass Fires" par A. Putnam et C. Speich, mars 1963. N.B.S. Contract CST-717. Études faites au Battelle Memorial Institute, Columbus, Ohio.
17. Extraits de "Fire Protection Handbook, 12<sup>e</sup> Edition", rédigé sous la direction de G. Tryon, 1962, publié par la National Fire Protection Association, Boston, Mass.
18. "Steel Construction. Manual of the American Institute of Steel Construction", 5<sup>e</sup> Édition, 1957. Publié par l'American Institute of Steel Construction, New York, N.Y.
19. "Effect of High Temperatures on Concretes Incorporating Different Aggregates" par N. Zoldners, 1960. Publié dans le Vol. 60 des Proceedings of the American Society for Testing Materials, Philadelphia, Pa.
20. Extraits d'un chapitre de "Specification 1962" intitulé "Fire Protection" par L. Ashton, 1962. Publié par The Architectural Press, Londres, Angleterre.
21. "Radiative Energy Transfer from Nuclear Detonations above 50KM. Altitude" par R. Miller et T. Passell, Contract OCD-OS-62-135(111), avril 1963. Publié par le Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif.
22. "Ignition of Materials by Large Yield Nuclear Weapons for Various Burst Heights and Atmospheric Conditions" par J. Rogers. Contract OCD-OS-62-135(111), mai 1963. Publié par le Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif.
23. "Transmission by the Earth's Atmosphere of Thermal Radiation from Nuclear Detonations Above 50 KM Altitude" par T. Passell. Contract OCD-OS-62-135, Task III, avril 1963. Publié par le Stanford Research Institute, Menlo Park, Calif.
24. "Ignition of Cellulosic Kindling Fuels by Very Brief Radiant Pulses" par S. Martin, USNDRL-TR-660. U.S. Naval Radiological Defense Laboratory, San Francisco, Calif.

## Les Effets incendiaires des armes nucléaires : une critique et un guide

## DATE DUE SLIP

[illegible]

